

# **EFFECTOS DE LA DISTANCIA ENTRE HILERAS A LA SIEMBRA SOBRE LOS COMPONENTES DEL RENDIMIENTO DE FORRAJE Y EL USO DE LA RADIACIÓN EN EL CULTIVO DE ALFALFA**

*Tesis presentada para optar al título de Magister de la Universidad de Buenos Aires,  
Área Producción Vegetal*

**Juan Mattera**

Ingeniero Agrónomo - Universidad de Buenos Aires - 2004

Lugar de trabajo: INTA - Estación Experimental Rafaela



Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano  
Facultad de Agronomía – Universidad de Buenos Aires



## COMITÉ CONSEJERO

Director de tesis

**Agustín A. Grimoldi**

Ingeniero Agrónomo (Universidad de Buenos Aires)

MSc. (Universidad de Buenos Aires)

Dr. (Technische Universität München, Alemania)

Consejero de Estudios

**Patricia Cornaglia**

Ingeniero Agrónomo (Universidad de Buenos Aires)

MSc. (Universidad de Buenos Aires)

**Luis Romero**

Ingeniero Agrónomo (Universidad Nacional del Litoral)

DEA (Universidad de Rennes, Francia)

## JURADO DE TESIS

Director de tesis

**Agustín A. Grimoldi**

Ingeniero Agrónomo (Universidad de Buenos Aires)

MSc. (Universidad de Buenos Aires)

Dr. (Technische Universität München, Alemania)

JURADO

**Gustavo Angel Maddonni**

Ingeniero Agrónomo (Universidad de Buenos Aires)

Dr. en Ciencias Agropecuarias (Universidad de Buenos Aires)

JURADO

**Daniel Jesús Collino**

Ingeniero Agrónomo (Universidad Nacional de Córdoba)

Dr. en Ciencias Agropecuarias (Universidad Nacional de Córdoba)

Fecha de defensa de la tesis: 23 de junio de 2011

**Dedicatoria**

**A mi familia: *Juan, María Elena, Luciana, Regina, Marta, Neca y Delia***

## **Agradecimientos**

Quiero agradecer a las siguientes personas por el apoyo que me brindaron durante la realización de esta tesis:

Andrea Tomás y Marcelo Pisani por los consejos, la ayuda y la compañía constante;

Germán Berone por las discusiones y colaboración;

Gustavo Bretschneider por la colaboración en la escritura;

María del Carmen Pérez, Gabriela Cencig y Alejandro Chiavassa por la contribución con la información climática;

Cleomar Tomatis por el apoyo en el trabajo de campo;

A mis compañeras de oficina Bárbara Tolozano, Lorena Armando, Marina Maina y Nina Dreher;

Luis Romero por el apoyo para la discusión y realización de los experimentos en INTA Rafaela;

Patricia Cornaglia por la colaboración en la discusión de los experimentos y los resultados;

Alejandra Cuatrín por la gran ayuda en los análisis estadísticos y en la discusión de los resultados;

Agustín Grimoldi por la dedicación constante, la predisposición y la enseñanza;

A mi familia y mis amigos.

**Declaración**

*Declaro que el material incluido en esta tesis es, a mi mejor saber y entender, original producto de mi propio trabajo (salvo en la medida en que se identifique explícitamente las contribuciones de otros), y que este material no lo he presentado, en forma parcial o total, como una tesis en ésta u otra institución.*

**Publicaciones derivadas de la tesis:**

Mattera J, Romero LA, Cuatrín A, Grimoldi AA (2009) Efectos de la distancia de siembra sobre la producción de biomasa y la persistencia de un cultivo de alfalfa. Revista Argentina de Producción Animal 29: 131-140.

## ÍNDICE GENERAL

DECLARACIÓN.....	v
PUBLICACIONES DERIVADAS DE LA TESIS.....	vi
ÍNDICE GENERAL.....	vii
ÍNDICE DE CUADROS.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ABREVIATURAS.....	xi
RESUMEN.....	xii
ABSTRACT.....	xiii

### Capítulo 1: INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1. ANTECEDENTES.....	1
1.2. OBJETIVO.....	3
1.3. HIPÓTESIS.....	4

### Capítulo 2: EFECTOS DE LA DISTANCIA ENTRE HILERAS A LA SIEMBRA SOBRE LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA Y LA PERSISTENCIA EN ALFALFA DE DIFERENTE GRADO DE REPOSO INVERNAL

2.1. INTRODUCCIÓN.....	5
2.1.1. Antecedentes.....	5
2.1.2. Objetivo.....	6
2.1.3. Hipótesis general.....	6
2.2. MATERIALES Y METODOS.....	6
2.2.1. Sitio de estudio.....	6
2.2.2. Tratamiento y diseño experimental.....	6
2.2.3. Mediciones.....	7
2.2.3.1. Producción de biomasa aérea.....	7
2.2.3.2. Componentes del rendimiento: Densidad de plantas y peso aéreo por planta. Persistencia del cultivo.....	8
2.2.3.4. Índice de rectangularidad.....	8
2.2.4. Análisis estadístico.....	8
2.3. RESULTADOS.....	9
2.3.1. Producción de biomasa aérea.....	9
2.3.2. Componentes del rendimiento: Densidad de plantas y peso aéreo por planta. Persistencia del cultivo.....	9
2.3.3. Índice de rectangularidad.....	11
2.4. DISCUSION.....	12

### Capítulo 3: EFECTOS DE LA SIEMBRA A DIFERENTES DISTANCIAS ENTRE HILERAS, A DENSIDAD CONSTANTE, SOBRE LOS COMPONENTES DEL RENDIMIENTO Y EL APROVECHAMIENTO DE LA RADIACIÓN EN EL CULTIVO DE ALFALFA

3.1. INTRODUCCION.....	14
3.1.1. Antecedentes.....	14
3.1.2. Objetivo.....	16
3.1.3. Hipótesis.....	16
3.2. MATERIALES Y METODOS.....	17
3.2.1. Sitio de estudio.....	17
3.2.2. Tratamiento y diseño experimental.....	17



<b>3.2.3. Mediciones.....</b>	<b>18</b>
3.2.3.1. Densidad de plantas e índice de rectangularidad.....	18
3.2.3.2. Producción de biomasa aérea.....	19
3.2.3.3. Componentes del rendimiento: Densidad de plantas, tallos por planta, número de tallos y peso por tallo.....	19
3.2.3.4. Características estructurales de las plantas: Relación hoja:tallo y jerarquías de los tallos por altura.....	19
3.2.3.5. Aprovechamiento de la radiación.....	20
3.2.3.6. Índice de área foliar y coeficiente de extinción de luz.....	20
3.2.3.7. Contenido de clorofila en hojas de distintos estratos.....	20
3.2.3.8. Peso por corona, área por corona y diámetro superior de la raíz pivotante	20
<b>3.2.4. Análisis estadístico.....</b>	<b>21</b>
<b>3.3. RESULTADOS.....</b>	<b>21</b>
3.3.1. Índice de rectangularidad.....	21
3.3.2. Producción de biomasa aérea.....	22
3.3.3. Componentes del rendimiento: Densidad de plantas, tallos por planta, peso por tallo, y número de tallos.....	24
3.3.4. Características estructurales de las plantas: Relación hoja:tallo y jerarquías de los tallos por altura.....	26
3.3.5. Aprovechamiento de la radiación.....	27
3.3.6. Índice de área foliar y coeficiente de extinción de luz.....	33
3.3.7. Contenido de clorofila en hojas de distintos estratos.....	34
3.3.8. Peso por corona, área por corona y diámetro superior de la raíz pivotante...	35
<b>3.4. DISCUSIÓN.....</b>	<b>36</b>
 <b>Capítulo 4: DISCUSIÓN GENERAL</b>	
<b>4.1. Efectos de la distancia entre hileras a la siembra sobre la acumulación de biomasa aérea y mecanismos involucrados .....</b>	<b>42</b>
<b>4.2. Conclusiones generales.....</b>	<b>45</b>
<b>4.3. Implicancias para el manejo del cultivo.....</b>	<b>45</b>
<b>4.4. Perspectivas para futuras investigaciones.....</b>	<b>46</b>
 <b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	 <b>47</b>
<b>APÉNDICE.....</b>	<b>51</b>

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Cuadro 3.1.</b> Análisis de la varianza y contrastes de tendencias para el efecto de la distancia entre hileras a la siembra y el rebrote sobre los componentes del rendimiento: densidad de plantas, tallos por planta, peso por tallo y número de tallos, para el cultivar de alfalfa Monarca .....	24
<b>Cuadro 3.2.</b> Valores medios y coeficiente de variación de la relación hoja:tallo para el cultivar de alfalfa Monarca, para cinco distancias entre hileras a la siembra. Análisis de la varianza para el efecto de la distancia entre hileras a la siembra y el rebrote sobre la relación hoja:tallo .....	27
<b>Cuadro 3.3.</b> Análisis de la varianza y contrastes de tendencias para el efecto de la distancia entre hileras a la siembra y el rebrote sobre la RFA interceptada y acumulada ( $RFA_{ia}$ ) y la eficiencia de uso de la radiación (EUR) para el cultivar de alfalfa Monarca .....	28
<b>Cuadro 3.4.</b> Valores medios del índice de área foliar (IAF) y del coeficiente de extinción de luz ( $k$ ) del canopeo del cultivar de alfalfa Monarca, en dos rebrotes, para cinco distancias entre hileras a la siembra. Análisis de la varianza para el efecto de la distancia entre hileras a la siembra y el rebrote sobre IAF y el $k$ ...	34
<b>Cuadro 3.5.</b> Valores medios de clorofila (SPAD) en tres estratos (inferior, medio y superior) del canopeo del cultivar de alfalfa Monarca, en dos rebrotes, para cinco distancias entre hileras a la siembra. Análisis de la varianza para el efecto de la distancia entre hileras a la siembra y el rebrote sobre el contenido de clorofila .....	34
<b>Cuadro 3.6.</b> Valores medios $\pm$ ES y cuartiles inferiores y superiores para el peso y el área de las coronas, y para el diámetro de la raíz pivotante al finalizar el período experimental del cultivar de alfalfa Monarca para cinco distancias entre hileras a la siembra. Análisis de la varianza para el efecto de la distancia entre hileras a la siembra y el rebrote sobre el peso y el área de las coronas, y para el diámetro de la raíz pivotante .....	35
<b>Cuadro 3.7.</b> Efecto de la distancia entre hileras a la siembra sobre la radiación fotosintéticamente activa interceptada acumulada ( $RFA_{ia}$ ) y la producción de biomasa expresado como desviación porcentual de la distancia de 30 cm para el cultivar de alfalfa Monarca .....	36
<b>Cuadro I.</b> Distribución de la biomasa de alfalfa en tres jerarquías de tallos (suprimidos, intermedios y dominantes) en el cultivar de alfalfa Monarca para cinco distancias entre hileras a la siembra en cuatro rebrotes .....	51

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 2.1.</b> Esquema del arreglo espacial teórico de las semillas para tres distancias entre hileras a la siembra .....	7
<b>Figura 2.2.</b> Producción de biomasa aérea total y por corte de cultivos puros de alfalfa durante tres años para cada cultivar: a) Monarca y b) Victoria para tres distancias entre hileras a la siembra .....	10
<b>Figura 2.3.</b> Efecto de la distancia entre hileras a la siembra sobre la evolución de los componentes del rendimiento: a) la densidad de plantas y b) el peso aéreo por planta, durante los tres años para los cultivares de alfalfa Monarca y Victoria para tres distancias entre hileras a la siembra .....	11
<b>Figura 2.4.</b> Efecto de la distancia entre hileras a la siembra sobre el índice de rectangularidad del arreglo espacial durante los tres años para los cultivares de alfalfa Monarca y Victoria para tres distancias entre hileras a la siembra .....	12
<b>Figura 3.1.</b> Imagen del canopeo generado en cada distancia entre hileras a la siembra y el respectivo esquema del arreglo espacial de plantas .....	18
<b>Figura 3.2.</b> Efecto de la distancia entre hileras a la siembra sobre el índice de rectangularidad del arreglo espacial para el cultivar de alfalfa Monarca para cinco distancias entre hileras a la siembra .....	22
<b>Figura 3.3.</b> Producción de biomasa aérea por corte de cultivos puros de alfalfa (cultivar Monarca) para cinco distancias entre hileras a la siembra .....	23
<b>Figura 3.4.</b> Producción de biomasa aérea total acumulada (suma de seis cortes) de cultivos puros de alfalfa (cultivar Monarca) en función de la distancia entre hileras a la siembra .....	23
<b>Figura 3.5.</b> Componentes del rendimiento en función de la distancia entre hileras a la siembra para cada rebrote: a)- Densidad de plantas, b)- Número de tallos por planta, c)- Número de tallos, d)- Peso por tallo, para el cultivar de alfalfa Monarca .....	25
<b>Figura 3.6.</b> Relaciones entre la producción de biomasa aérea y los distintos componentes del rendimiento: a)- Densidad de plantas, b)- Número de tallos por planta, c)- Número de tallos, d)- Peso por tallo, para el cultivar de alfalfa Monarca para cinco distancias entre hileras a la siembra .....	26
<b>Figura 3.7.</b> Fracción de la RFA interceptada ( $fRFA_i$ ) por el canopeo del cultivar de alfalfa Monarca para cinco distancias entre hileras a la siembra para cinco rebrotes .....	29
<b>Figura 3.8.</b> RFA interceptada y acumulada ( $RFA_{ia}$ ; panel superior) y eficiencia de uso de la radiación (EUR; panel inferior) para el cultivar de alfalfa Monarca para cinco distancias entre hileras a la siembra para cinco rebrotes .....	30
<b>Figura 3.9.</b> a)- Sumatoria de RFA interceptada y acumulada ( $RFA_{ia}$ ) durante el período experimental (septiembre a enero), y b)- Eficiencia de uso de la radiación (EUR) global en función de la distancia entre hileras a la siembra para el cultivar de alfalfa Monarca .....	32
<b>Figura 3.10.</b> Sumatoria de biomasa acumulada en función de la sumatoria de RFA interceptada y acumulada ( $RFA_{ia}$ ) durante el período experimental (septiembre a enero) en función de la distancia entre hileras a la siembra para el cultivar de alfalfa Monarca .....	33
<b>Figura 3.11.</b> Relación entre el índice de área foliar (IAF) y la eficiencia de uso de la radiación (EUR) para el cultivar de alfalfa Monarca, para dos rebrotes, para cinco distancias entre hileras a la siembra .....	40

## Resumen

### EFFECTOS DE LA DISTANCIA ENTRE HILERAS A LA SIEMBRA SOBRE LOS COMPONENTES DEL RENDIMIENTO DE FORRAJE Y EL USO DE LA RADIACIÓN EN EL CULTIVO DE ALFALFA

La siembra de alfalfa (*Medicago sativa* L.) se caracteriza por presentar un arreglo espacial rectangular, *i.e.* mayor distancia entre hileras que entre plantas dentro de la hilera. Si se acercan las hileras de siembra se genera un arreglo espacial más cuadrado que podría influir sobre la competencia intra-específica y el aprovechamiento de los recursos, especialmente radiación. El objetivo de esta tesis fue: estudiar el efecto de la distancia entre hileras a la siembra sobre los componentes del rendimiento de forraje y la captura y eficiencia en el uso de la radiación en el cultivo de alfalfa. Se realizaron dos experimentos evaluando distancias entre hileras a la siembra en cultivos puros de alfalfa. El primero experimento fue de largo plazo y se evaluó el efecto de la distancia sobre variables productivas en dos cultivares con distinto reposo invernal (Monarca y Victoria) bajo una misma densidad de siembra. En el segundo experimento se estudió el efecto de la distancia entre hileras a la siembra, bajo una misma densidad de plantas establecida por raleo, sobre variables productivas y ecofisiológicas en un cultivo de alfalfa (Monarca) durante el primer año de producción. En ambos experimentos la producción de biomasa aérea se favoreció por los arreglos espaciales más cuadrados ( $p < 0,05$ ) hasta una distancia óptima, entre 15 cm y 17,5 cm. Adicionalmente, se observó que en distancias cercanas hubo mayor densidad de plantas ( $p < 0,01$ ). Las respuestas en producción de biomasa al reducir la distancia entre hileras a la siembra estuvieron determinadas por el aumento lineal en la intercepción de radiación ( $p < 0,0001$ ) y por un patrón de tipo óptimo en la eficiencia de uso de la radiación ( $p < 0,01$ ). Se concluye que la reducción en la distancia entre hileras a la siembra hasta una distancia óptima, entre 15 cm y 17,5 cm, es una práctica agronómica que permite establecer un arreglo espacial más favorable del cultivo de alfalfa que impacta sobre la producción de forraje.

Palabras clave: alfalfa, distancia entre hileras a la siembra, producción de biomasa, componentes del rendimiento de forraje, competencia intra-específica, intercepción de la radiación, eficiencia de uso de la radiación.

## Abstract

### EFFECTS OF ROW DISTANCE AT SOWING ON FORAGE YIELD COMPONENTS AND RADIATION USE IN ALFALFA CROP

Alfalfa (*Medicago sativa* L.) sowing is characterized for presenting a rectangular spatial arrangement, *i.e.* more distance among sowing rows than among plants in the row. So that, the reduction of row distance allows more square spatial arrangement that can influence intra-specific competition and resource utilization, specially radiation. The objective of this thesis was: to study the effect of row distance at sowing on forage yield components and radiation capture and use efficiency in alfalfa crop. Two experiments were performed to assess different row distances at sowing in pure alfalfa crops. The first one, a long-term field experiment, assessed the effect of row distance at sowing on productive variables in two cultivars with different winter dormancy (Monarca and Victoria) under the same sowing density. The second experiment studied the effect of row distance at sowing, under the same plant density established by thinning, on productive and ecophysiological variables of an alfalfa crop (Monarca) during its first production year. For both experiments, aerial biomass production was favored by more square arrangements ( $p < 0,05$ ) up to an optimal distance, between 15 cm and 17,5 cm. Additionally, it was observed a higher plant density at near distances ( $p < 0,01$ ). Biomass responses to reduced sowing distance were determined by both a linear increase in radiation interception ( $p < 0,0001$ ) and an optimal pattern in the radiation use efficiency ( $p < 0,01$ ). It is concluded that the reduction of the row distance at sowing up to an optimal distance, between 15 cm and 17,5 cm, is an agronomical practice that allows more favorable spatial arrangements of alfalfa crop that impact on forage production.

Key words: alfalfa, row distance at sowing, biomass production, forage yield components, intra-specific competition, radiation interception, radiation use efficiency.

## Capítulo 1: INTRODUCCIÓN GENERAL

### 1.1. ANTECEDENTES

La alfalfa (*Medicago sativa* L., *Leguminosae*) es considerada la forrajera cultivada más antigua, y tiene su origen en la región suroeste de Asia. Se considera que la especie habría llegado a la Provincia de Buenos Aires a mediados del siglo XVIII, aunque antes habría sido utilizada en la región de Cuyo y Córdoba (Hijano y Basigalup, 1995). Es una de las especies forrajeras de mayor importancia mundial debido a su elevado potencial de producción de forraje de alta calidad para la alimentación de rumiantes, con una superficie estimada de 32 millones de hectáreas sembradas en todo el mundo (Michaud *et al.* 1988). En la Argentina es muy utilizada, siendo la principal pastura perenne cultivada con una superficie que en la actualidad rondaría los cinco millones de hectáreas entre pasturas puras y asociadas (Basigalup *et al.* 2007), representando el 58% de las pasturas perennes sembradas en el país (INDEC, 2001).

La alfalfa es una especie que para alcanzar producciones elevadas de forraje requiere suelos profundos, bien aireados y fértiles, y se caracteriza por tener una alta sensibilidad al anegamiento del suelo (Basigalup *et al.* 2007). Esto implica que la alfalfa requiere suelos con buena aptitud y por lo tanto compite con los cultivos agrícolas en el uso de los mismos. De esta forma al aumentar la producción forrajera podría mejorar la competitividad del cultivo de alfalfa frente a cultivos agrícolas que han tenido un importante crecimiento en la última década y que provocaron desplazamientos de pasturas hacia suelos de menor aptitud. En este sentido es importante comprender cómo las condiciones ambientales y las prácticas de manejo modifican el crecimiento y desarrollo de la alfalfa afectando la producción, calidad nutritiva y persistencia del cultivo (Fick *et al.* 1988). Los efectos sobre la producción de biomasa de alfalfa pueden ser analizados con mayor nivel de detalle a través del análisis de los cambios en cada uno de los componentes de rendimiento forrajero: la densidad de plantas  $m^{-2}$ , el número de tallos por planta y el peso por tallo (Volenc *et al.* 1987), y también estudiando los componentes del modelo ecofisiológico de aprovechamiento de la radiación incidente: la intercepción de la radiación y su conversión en biomasa (Monteith, 1977). Por ejemplo, la primera aproximación ha sido utilizada en alfalfa para analizar el efecto de diversas prácticas de manejo como la densidad de plantas (Volenc *et al.* 1987), el nivel de humedad del suelo (Pembleton *et al.* 2009) y la frecuencia de defoliación (Teixeira *et al.* 2007a); mientras que la aproximación ecofisiológica ha sido usada para evaluar el efecto de distintos cultivares (Avicé *et al.* 1997), del sistema de riego (Collino *et al.* 2005), y también la frecuencia de defoliación (Teixeira *et al.* 2007a), entre otros. En la tesis se estudia el efecto de la siembra a diferentes distancias entre hileras, a densidad constante, sobre la producción de biomasa aérea en alfalfa bajo las dos aproximaciones mencionadas, es decir considerando el efecto de la distancia sobre los componentes del rendimiento de forraje y sobre los componentes del modelo ecofisiológico de aprovechamiento de la radiación incidente.

La distancia entre hileras a la siembra se encuentra entre las prácticas de manejo agronómico que afectan la producción de biomasa de un cultivo, ya que al modificar la distribución en el espacio de las plantas, es decir el arreglo espacial, incide en el logro de una estructura óptima de cultivo para alcanzar el potencial de producción. El arreglo espacial puede ser descripto por su rectangularidad: el cociente entre la distancia entre hileras y la distancia de las plantas en una misma hilera (Willey y Heath 1969). El tipo

de siembra generalmente utilizado en alfalfa se caracteriza por presentar mayor distancia entre hileras que entre plantas de una misma hilera, determinando así un arreglo marcadamente rectangular quedando mayor espacio descubierto entre las hileras. Es de destacar que si a una misma densidad se disminuye la distancia entre hileras, aumentaría la distancia entre plantas de cada hilera y se generaría un arreglo espacial más cuadrado con la posible consecuencia de anticipar el cierre del espacio entre las hileras logrando así una cobertura más temprana del mismo.

Los diferentes arreglos espaciales de las plantas producidos al cambiar la distancia entre hileras a la siembra pueden afectar las relaciones de competencia por los recursos tanto a nivel intra-específico como inter-específico. Con respecto a la competencia intra-específica se pueden producir tres tipos de efectos: *i*) mortalidad denso-dependiente *ii*) efectos compensatorios entre tamaño y densidad, y *iii*) alteración de la estructura de tamaños de la población (Park *et al.* 2003). Por ejemplo, se encontró que las altas densidades comúnmente utilizadas para asegurar la implantación del cultivo de alfalfa crean condiciones que generan una alta competencia intra-específica provocando una elevada mortalidad de plantas (Romero *et al.* 1991). No obstante, se ha documentado el efecto positivo de la densidad de plantas sobre la producción de alfalfa, debido a un aumento del número de tallos por unidad de superficie (Volenec *et al.* 1987). Por encima de un determinado valor umbral de densidad de siembra tanto la producción como el número de plantas establecidas al final del primer año tienden a estabilizarse (Romero *et al.* 1991). En el caso de la distancia entre hileras a la siembra, sería importante conocer cómo una disposición más equidistante de las plantas podría modificar las relaciones de competencia intra-específica dentro del cultivo.

La distancia y densidad de siembra son prácticas que determinan la capacidad de un cultivo para interceptar recursos, entre ellos la radiación incidente (Kruk y Satorre 2004). En cultivos anuales se usa frecuentemente el modelo ecofisiológico planteado por Monteith (1977) donde el rendimiento depende de la radiación fotosintéticamente activa interceptada acumulada ( $RFA_{ia}$ ) y la eficiencia de uso de dicha radiación (EUR) durante el ciclo del cultivo (Andrade *et al.* 1996). Por ejemplo, en el cultivo de soja aumentos de la densidad incrementaron la  $RFA_{ia}$  y la producción de biomasa, desde emergencia a R6 (Edwards *et al.* 2005). Sin embargo, la producción de biomasa en este cultivo llega a saturación recién a valores elevados de  $RFA_{ia}$ : el tipo de respuesta asintótica se explicaría por disminuciones de la EUR en altas densidades (Purcell *et al.* 2002). De manera similar, al evaluar el efecto de la distancia entre hileras a la siembra en soja se encontró que los mayores rendimientos en distancias menores se relacionaron con mayor  $RFA_{ia}$  y mayores tasas de crecimiento del cultivo desde emergencia a R5 (Board *et al.* 1992a). En ensayos con canopeos de maíz se encontraron efectos significativos de la distancia entre hileras a la siembra sobre la  $RFA_{ia}$  y el rendimiento, con respuestas positivas con menores distancias y arreglos espaciales más cuadrados (Barbieri *et al.* 2000). Sin embargo, arreglos más cuadrados (*i.e.* menores distancias) no tuvieron efectos significativos sobre el rendimiento cuando en los ensayos planteados se supera el índice de área foliar (IAF) crítico, como sucedió en altas densidades, y la intercepción de radiación en floración fue máxima (Maddonni *et al.* 2006). En este último trabajo se registró una reducción en la EUR post-floración por menores distancias, así también por altas densidades. Los resultados hallados en los trabajos citados indicarían que la distancia entre hileras a la siembra puede modificar la acumulación de biomasa y el rendimiento principalmente a través de cambios en la intercepción de radiación. Asimismo, se encuentran evidencias de disminución de la EUR asociados a la densidad y al distanciamiento durante estadios avanzados con altos valores de IAF.

Este modelo ecofisiológico ya ha sido utilizado en cultivos perennes como la alfalfa encontrándose, en condiciones no limitantes, una fuerte relación lineal positiva entre  $RFA_{ia}$  y producción de biomasa aérea, tanto en cada rebrote (Gosse *et al.* 1986) como en el total anual (Teixeira *et al.* 2007b). En los experimentos realizados por Teixeira utilizaron este modelo ecofisiológico en conjunto con el estudio de los componentes del rendimiento y encontraron que las diferencias de producción a favor de la frecuencia de pastoreo baja, se explicaron principalmente por una mayor  $RFA_{ia}$  (Teixeira *et al.* 2007b) que determinó una mayor expansión foliar y un mayor peso por tallo. Si bien este modelo no ha sido aún aplicado en estudios de arreglo espacial con especies forrajeras leguminosas, primariamente se podría hipotetizar que arreglos espaciales más cuadrados permiten adelantar el cierre del canopeo en el espacio entre las hileras y así aumentar la  $RFA_{ia}$  en el transcurso del rebrote. Esto sería de particular importancia en canopeos forrajeros donde se producen cortes a intervalos regulares, volviéndose en forma recurrente a una situación de baja cobertura e intercepción lumínica. Por otra parte, la arquitectura del canopeo de alfalfa posee características que le permiten una eficiente captura de la luz, dada por la expresión de distintos ángulos foliares entre estratos y la capacidad de los folíolos de moverse siguiendo al sol (Travis y Reed 1983; Heichel *et al.* 1988). En ese sentido, se sabe que la tasa fotosintética aumenta en forma lineal ante incrementos del IAF (Sheehy *et al.* 1979), alcanzando saturación recién a elevados valores de IAF (de 5 a 6), consecuencia de un mayor sombreado y de menores temperaturas en los estratos inferiores del canopeo (Heichel *et al.* 1988). Teniendo en cuenta que las pasturas se manejan bajo sistemas de corte frecuente, el rango de valores de IAF que alcanza normalmente el cultivo no sería suficiente como para afectar la eficiencia fotosintética del canopeo, por lo que en principio no se esperarían cambios importantes en EUR por efecto de la distancia entre hileras a la siembra, a no ser que se produzcan cambios contrastantes en el IAF, lo cual es aún desconocido en este cultivo.

En las experiencias disponibles donde se registró mayor producción de biomasa con menores distancias en cultivos puros de alfalfa (Roufail 1975; Lutz y Morley 1982), no se evaluaron los componentes del rendimiento como tampoco se analizaron los componentes del modelo ecofisiológico de aprovechamiento de la radiación. En el caso de Lutz y Morley (1982) presenta la desventaja de que los efectos de la distancia entre hileras a la siembra se evaluaron con diferentes densidades de siembra, por lo cual los efectos pudieron estar confundidos. Hasta el momento, no se conocen claramente los efectos de la distancia sobre la producción de alfalfa a una misma densidad de siembra, ni tampoco los mecanismos que estarían involucrados.

## 1.2. OBJETIVO

En base a los antecedentes presentados se plantea el siguiente **objetivo**:

- a. Estudiar el efecto de la distancia entre hileras a la siembra sobre los componentes del rendimiento de forraje y la captura y eficiencia en el uso de la radiación en el cultivo de alfalfa.



### 1.3. HIPÓTESIS

Para cumplir con el objetivo planteado, se pusieron a prueba las siguientes **hipótesis**:

- a. Al disminuir la distancia entre hileras a la siembra se generan arreglos espaciales más cuadrados que aumentan la producción de biomasa aérea en el cultivo de alfalfa.
- b. El número y peso de tallos es mayor a menor distancia entre hileras a la siembra por una menor competencia intra-específica.
- c. La  $RFA_{ia}$  durante el rebrote es mayor a menor distancia entre hileras a la siembra. Este arreglo espacial permite alcanzar antes el IAF crítico y aumentar el tiempo transcurrido durante el rebrote con intercepción óptima.
- d. La distancia entre hileras a la siembra no afecta la EUR dentro del rango de biomasa comúnmente explorado por cultivos de alfalfa destinados a la producción de forraje.

Esta tesis contiene dos capítulos experimentales. En el primer capítulo experimental con un enfoque más general y de largo plazo se estudió el efecto de la siembra a diferentes distancias entre hileras, a densidad constante, sobre la producción de biomasa aérea y la persistencia del cultivo en tres años de vida de la pastura. Se evaluaron tres distancias entre hileras a la siembra comúnmente utilizadas para este tipo de pasturas (15 cm, 17,5 cm y 21 cm) y con una misma densidad inicial de plantas. El estudio se realizó en dos cultivares de alfalfa con diferente grado de reposo invernal: Monarca (sin reposo invernal) y Victoria (con reposo invernal intermedio). En este experimento se estudió el efecto sobre la producción de biomasa y los componentes del rendimiento: densidad de plantas y peso por planta. Al ser un experimento de largo plazo permitió evaluar la persistencia de la pastura, que es un atributo importante en pasturas perennes, y especialmente en alfalfa que carece de capacidad de resiembra, donde una mayor persistencia del cultivo determina una mayor eficiencia económica. En el segundo capítulo experimental se estudió el efecto de la distancia entre hileras a la siembra en la primavera-verano del primer año de vida de una pastura de alfalfa sembrada en el otoño. En este experimento se evaluó un rango de distancias más amplio que en el primer experimento (10 cm, 15 cm, 17,5 cm, 20 cm y 30 cm) con una misma densidad de plantas establecida por medio de un raleo efectuado en post-emergencia. En este segundo experimento se estudió también la respuesta productiva pero profundizando en mayor medida sobre los mecanismos involucrados. De esta forma se estudió el efecto sobre la producción de biomasa aérea, y se evaluó nuevamente la dinámica de los componentes del rendimiento considerando un nivel de detalle mayor que en el primer experimento: densidad de plantas, tallos por planta, número de tallos, y peso por tallo. A su vez, en este segundo experimento se incluyeron mediciones que permitieron estudiar el efecto sobre los componentes ecofisiológicos determinantes de la producción de biomasa: intercepción y eficiencia de uso de la radiación. Además, se realizaron mediciones adicionales como la relación hoja:tallo, la distribución de la biomasa en jerarquías de tallos según su altura, el índice de área foliar, el contenido de clorofila de las hojas en distintos estratos del canopy y características estructurales de las coronas de las plantas al finalizar el experimento. Por último, en el cuarto capítulo se discuten en conjunto los resultados de ambos ensayos y se plantean las implicancias y perspectivas que surgen del estudio realizado.

## Capítulo 2: EFECTOS DE LA DISTANCIA ENTRE HILERAS A LA SIEMBRA SOBRE LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA Y LA PERSISTENCIA EN ALFALFA DE DIFERENTE GRADO DE REPOSO INVERNAL <sup>(1)</sup>

### 2.1. INTRODUCCIÓN

#### 2.1.1. Antecedentes

La distancia entre hileras a la siembra es una práctica que afecta la capacidad de un cultivo para captar recursos, entre ellos la radiación incidente (Bullock *et al.* 1988). El acercamiento de las hileras, que genera una distribución más equidistante de las plantas, ha sido estudiado en diversos cultivos agrícolas, donde se reportan casos con respuestas favorables sobre el rendimiento por un aumento en la cantidad de radiación fotosintéticamente activa interceptada durante el ciclo del cultivo (Board *et al.* 1992a; Barbieri *et al.* 2000, Andrade *et al.* 2002). En pasturas perennes son escasos los antecedentes acerca del efecto del acercamiento de las hileras sobre la producción de forraje. En pasturas de alfalfa existen antecedentes de ensayos realizados en Australia con una mayor producción a menores distancias (Roufail 1975; Lutz y Morley 1982). El ensayo realizado por Lutz y Morley (1982) presenta la desventaja de que al acercar la distancia entre hileras a la siembra se incrementó la densidad por lo cual se confunden los efectos de ambas prácticas. En Balcarce (Argentina) al intersembrar alfalfa o trébol rojo sobre pasturas degradadas hallan que menores distancias aumentan el índice de área foliar y la producción en el primer corte (Colabelli *et al.* 2002). Contrariamente, en una pastura de agropiro sembrada en un suelo marginal (Natracuol) de la Pampa Deprimida (Argentina) en un año con restricción hídrica, el arreglo más cuadrado produjo menos forraje por una menor eficiencia de uso de la radiación (Bertram 2008).

La siembra de pasturas de especies perennes se realiza generalmente con altas densidades de semilla de forma tal de asegurar una buena implantación. Esta situación puede determinar condiciones que acentúen la competencia intra-específica del cultivo. En este contexto, los cambios en la distancia entre hileras a la siembra pueden afectar las relaciones de competencia a nivel intra-específico y el tamaño individual de las plantas (Park *et al.* 2003), y esto influir en las características productivas de la pastura (Colabelli *et al.* 2002). En los últimos años se ha difundido en la Argentina el uso de maquinarias de siembra que han variado la distancia entre las hileras. Tradicionalmente la distancia entre hileras era de 15 cm a 17,5 cm, y actualmente ha ido aumentado hasta una distancia de 21-22 cm. Naturalmente, a una misma densidad de plantas esta tendencia en el diseño de la maquinaria agrícola produciría arreglos más rectangulares de las plantas. La experiencia se realizó en la EEA INTA-Rafaela durante tres años de producción del cultivo. Esta información es de interés debido a la extensa superficie cultivada con alfalfa en el país, y porque aumentar la producción forrajera resulta un aspecto clave en la intensificación de las tierras destinadas para la ganadería.

---

<sup>(1)</sup> Mattera J, Romero LA, Cuatrín A, Grimoldi AA (2009) Efectos de la distancia de siembra sobre la producción de biomasa y la persistencia de un cultivo de alfalfa. Revista Argentina de Producción Animal 29: 131-140.

### 2.1.2. Objetivo

El objetivo de este capítulo fue analizar los efectos de la distancia entre hileras a la siembra sobre la producción de biomasa aérea en el largo plazo y la persistencia en alfalfa de diferente grado de reposo invernal.

### 2.1.3. Hipótesis

Al disminuir la distancia entre hileras a la siembra se generan arreglos espaciales más cuadrados que aumentan la producción de biomasa aérea en el cultivo de alfalfa. (Sección 1.3; Hipótesis a).

## 2.2. MATERIALES Y METODOS

### 2.2.1. Sitio de estudio

El experimento se realizó en la EEA INTA-Rafaela (31°12' Latitud S. ; 61°30' Longitud O.) en el Centro-Oeste de la Prov. de Santa Fe. El clima de la región es sub-húmedo húmedo y mesotermal. El experimento se llevó a cabo en un lote correspondiente al complejo *Leh2* con suelos Argiudoles típicos (Serie Rafaela) y Argiudoles ácuicos (Serie Lehman) (Mosconi *et al.* 1981) con 3,28% de materia orgánica (Walkley y Black) en el estrato superior del suelo (0-15 cm), 65,6 ppm de fósforo (Bray y Kurtz 1) y 6 de pH (agua). Abundantes precipitaciones en el período previo a la implantación (415 mm en febrero y marzo de 2003) e inmediatamente posterior al mismo (30 mm) aseguraron buenas condiciones hídricas en la cama de siembra. Los veranos 2003-04 y 2005-06 fueron más secos que lo normal para Rafaela, las precipitaciones acumuladas fueron respectivamente 52 y 39% inferiores que la serie histórica (352 mm). En cambio, el verano 2004-05 fue normal (353 mm).

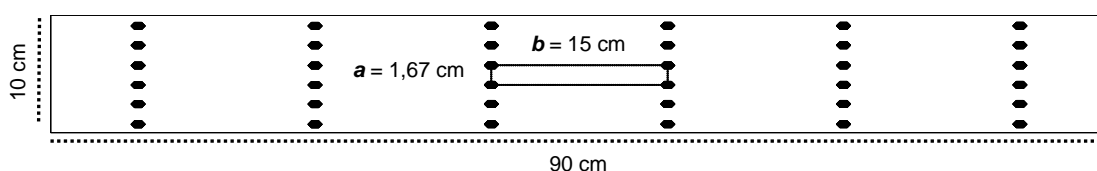
### 2.2.2. Tratamiento y diseño experimental

Se sembraron dos cultivares de alfalfa ampliamente difundidos en el país: Monarca (sin reposo invernal) y Victoria (con reposo invernal intermedio). Ambos materiales fueron desarrollados por el INTA y se utilizan como testigos en los ensayos de la red de alfalfa del INTA (Spada 2008). En Rafaela los cultivares sin reposo invernal presentan la ventaja de alcanzar mayores tasas de crecimiento en otoño-invierno. Las semillas no fueron inoculadas, ya que en el lote se realizan frecuentemente ensayos de alfalfa y la presencia de poblaciones de *Sinorhizobium meliloti* naturalizadas fue observada en reiteradas oportunidades.

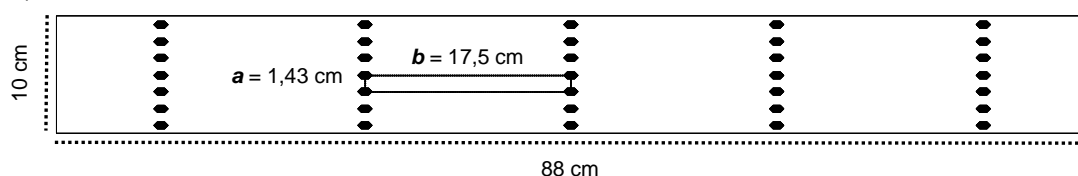
Se evaluaron tres distancias entre hileras a la siembra: 15 cm, 17,5 cm y 21 cm. Las distancias evaluadas se eligieron en relación con las tendencias observadas en los equipos disponibles para la siembra de pasturas. La densidad de siembra fue de 7 kg de semilla  $\text{ha}^{-1}$ , relativamente más baja a la utilizada comúnmente por productores pero suficiente para lograr pasturas altamente productivas (Romero *et al.* 1991). La densidad de siembra fue la misma en todos los tratamientos, para lo cual se ajustó en cada distancia la cantidad de semillas sembradas por metro lineal, logrando así la misma densidad de semillas por  $\text{m}^2$  (ver arreglo espacial en Figura 2.1). Es decir, a medida que se acercan las hileras, se alejan las semillas en la hilera de siembra siendo en este caso la distribución más equidistante.

El ensayo se sembró en el otoño de 2003 (mayo), con un diseño de bloques completos aleatorizados ( $n=3$ ) y se evaluó durante un período de tres años. El suelo se preparó mediante labranza convencional con dos labores de rastra de discos y una labor con rastra de dientes para uniformar el terreno. La siembra se realizó con una sembradora monosurco. Previamente se marcaron hileras de 5 m de longitud, estableciendo seis hileras por parcela en la distancia de 15 cm, cinco hileras en la de 17,5 cm y cuatro hileras en la de 21 cm, de esta forma se obtuvieron parcelas de tamaño similar. Las parcelas se mantuvieron libres de malezas por medio de la aplicación de herbicidas selectivos.

a)- Distancia de 15 cm



b)- Distancia de 17,5 cm



c)- Distancia de 21 cm

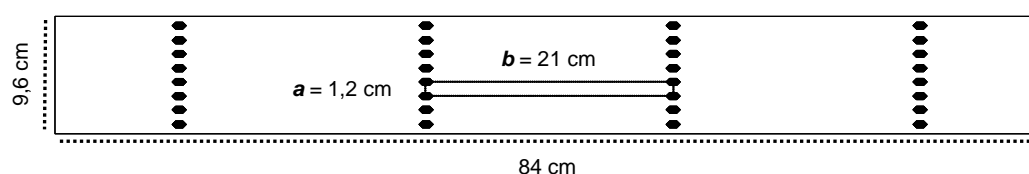


Figura 2.1. Esquema del arreglo espacial teórico de las semillas para tres distancias entre hileras a la siembra: a)- 15 cm, b)- 17,5 cm, y c)- 21 cm. La densidad de siembra fue la misma en las tres distancias evaluadas. La separación entre semillas dentro de la hilera está representada por la letra *a*, en tanto que la letra *b* identifica la separación entre las hileras.

## 2.2.3. Mediciones

### 2.2.3.1. Producción de biomasa aérea

La producción de biomasa aérea se evaluó por medio de cortes durante los tres años de duración del ensayo. El primer corte se realizó a los 140 días desde la siembra. A partir de ese momento, se hicieron otros 20 cortes distribuidos en los tres años. Los cortes se efectuaron con las parcelas en 10% de floración en primavera-verano ( $33 \pm 7$  días entre cortes) y con una frecuencia más baja en otoño-invierno ( $60 \pm 17$  días entre cortes). Los cortes se realizaron con motoguadadora a una altura de 4 cm sobre el suelo. La superficie cortada de cada parcela fue de:  $4,5 \text{ m}^2$  para 15 cm,  $4,4 \text{ m}^2$  para 17,5 cm, y  $4,2 \text{ m}^2$  para 21 cm. Se registró el peso fresco del material cosechado y se tomaron muestras para estimar el porcentaje de materia seca del forraje en cada parcela. Dichas muestras fueron secadas en estufa ( $60^\circ\text{C}$ ) durante 48 h. Los valores se convirtieron a materia seca y se estandarizaron a una misma unidad de superficie (hectárea) para las comparaciones entre tratamientos.

### *2.2.3.2. Componentes del rendimiento: Densidad de plantas y peso aéreo por planta. Persistencia del cultivo.*

Se estudiaron los componentes del rendimiento con un enfoque general a través del número de plantas y el peso aéreo de las mismas. Con esta finalidad se realizaron recuentos de plantas en siete oportunidades (30/09/03, 23/03/04, 17/11/04, 04/04/05, 19/10/05, 27/12/05 y 02/03/06). Se efectuaron el día posterior a cada uno de los rebrotes para facilitar la identificación de cada una de las coronas, en forma visual y manual, inspeccionando detalladamente la base de las plantas. Se realizaron sobre la parte central de cada parcela en una superficie de:  $0,9\text{m}^2$  para 15 cm,  $0,88\text{m}^2$  para 17,5 cm; y  $0,84\text{m}^2$  para 21 cm. Todos los recuentos fueron posteriormente estandarizados a una misma unidad de superficie ( $\text{m}^2$ ). Se estimó el peso aéreo promedio por planta a través del cociente de la producción de biomasa aérea  $\text{m}^{-2}$  y el número de plantas  $\text{m}^{-2}$ . La persistencia de las pasturas se evaluó por medio de la dinámica del número de plantas en cada tratamiento a través de los tres años de duración del ensayo.

### *2.2.3.4. Índice de rectangularidad*

Para evaluar el arreglo espacial de las plantas en cada tratamiento, se calculó el índice de rectangularidad como el cociente entre la distancia entre hileras y la distancia entre plantas de una misma hilera (Willey y Heath 1969). Para el cálculo se utilizaron las distancias experimentales (15 cm, 17,5 cm y 21 cm) y la distancia promedio entre plantas de una misma hilera registradas en los recuentos periódicos de número de plantas (asumiendo una distribución regular de plantas en la hilera). Un índice igual a uno indica un arreglo espacial cuadrado, donde la distancia entre hileras es igual a la distancia entre plantas de la misma hilera. A medida que el índice se aleja de la unidad el arreglo espacial se hace más rectangular.

### **2.2.4. Análisis estadístico**

La producción total de biomasa se analizó mediante análisis de varianza de un diseño de bloques completos aleatorizados con arreglo factorial de los tratamientos (factores: cultivar y distancia entre hileras a la siembra). La dinámica de la producción de biomasa aérea, densidad de plantas, peso aéreo por planta e índice de rectangularidad se analizaron en un diseño de bloques completos al azar con arreglo factorial de los tratamientos y medidas repetidas en el tiempo. Para los análisis se utilizó el procedimiento MIXED del paquete estadístico SAS v9.1.3 (SAS Institute, Cary, NC. 2004). La interacción entre distancia y cultivar no fue significativa para ninguna de las variables. Las diferencias entre distancias se evaluaron por medio de comparaciones múltiples dentro de cada cultivar. Cuando se detectaron diferencias significativas entre cultivares las mismas se evaluaron por medio de comparaciones múltiples. En complemento, los datos de densidad fueron ajustados mediante regresiones lineales simples en función del tiempo para el período de mayor mortalidad de plantas (Marzo 04 – Abril 05) con el objeto de comparar pendientes (tasas de mortalidad) mediante la prueba de paralelismo y coincidencia (Pontaque 2005) con el procedimiento GLM del paquete estadístico SAS v9.1.3 (SAS Institute, Cary, NC. 2004).

## 2.3. RESULTADOS

### 2.3.1. Producción de biomasa aérea

La distancia entre hileras a la siembra tuvo un efecto significativo sobre la producción total de biomasa aérea ( $p<0,01$ ; Figura 2.2). En ambos cultivares, la mayor acumulación de biomasa se registró en la distancia intermedia de 17,5 cm para todo el ciclo del cultivo. En términos relativos, la producción total a 17,5 cm fue superior a 15 cm en un 20% y en un 15% para los cultivares Monarca y Victoria respectivamente ( $p<0,01$ ); con respecto a la distancia de 21 cm la producción fue 11% superior en Monarca ( $p<0,01$ ), mientras que en Victoria fue un 6% mayor aunque las diferencias no llegaron a ser significativas ( $p=0,11$ ). En términos generales, la producción de biomasa aérea del cultivar Monarca (sin reposo invernal) fue un 14% superior ( $p<0,05$ ) a la del cultivar Victoria (reposo invernal intermedio). Como era de esperarse, las diferencias de producción entre distancias entre hileras a la siembra se hallaron principalmente en los períodos primavera-estivales para los tres años evaluados (Figura 2.2). Para el cultivar Monarca, la producción de biomasa en la distancia de 17,5 cm fue superior en relación con la distancia de 15 cm en 8 de los 10 cortes donde se encontraron diferencias significativas, y en 5 de los 10 cortes en comparación con la distancia de 21 cm. Para el cultivar Victoria, la producción de biomasa en la distancia de 17,5 cm fue superior en relación con la distancia de 15 cm en 6 de los 10 cortes donde se encontraron diferencias significativas, y en 5 de los 10 cortes en relación con la distancia de 21 cm (Figura 2.2).

### 2.3.2. Componentes del rendimiento: Densidad de plantas y peso aéreo por planta. Persistencia del cultivo.

En el primer recuento se registró un alto número de plantas en todos los tratamientos analizados, demostrando que la siembra del ensayo fue satisfactoria (Figura 2.3.a). No obstante, ya desde ese momento, la distancia entre hileras a la siembra tuvo un efecto significativo ( $p<0,01$ ) sobre la densidad de plantas instaladas. Se registró una mayor densidad de plantas en la distancia de 15 cm, hasta el año después de la siembra en el cultivar Monarca y hasta el año y medio en el cultivar Victoria (Figura 2.3.a). Para ambos cultivares, la densidad de plantas en dicha distancia fue un 30% mayor con respecto a los otros tratamientos. Aunque en esas condiciones, las plantas de ambos cultivares fueron marcadamente menores en tamaño (aprox. 40% más livianas;  $p<0,01$ ) con respecto a las plantas de distancias más separadas durante los dos primeros años del cultivo (Figura 2.3.b). Entre la distancias de 17,5 cm y 21 cm no se encontraron diferencias en el peso aéreo por planta. En posteriores recuentos, la densidad fue disminuyendo, registrándose altas tasas de mortalidad en el segundo año del ciclo del cultivo. En ese período (Marzo 04 – Abril 05), la tasa de mortalidad de plantas fue mayor en la distancia de 15 cm, ya que se registró una pendiente significativamente más negativa ( $p<0,05$ ) en función del tiempo en comparación con los otros tratamientos. Dicho efecto determinó que a partir de Abril de 2005 no se encontraran diferencias en densidad asociadas a la distancia entre hileras a la siembra (Figura 2.3.a), lo cual sería indicativo de una persistencia del cultivo similar entre distancias entre hileras a la siembra.

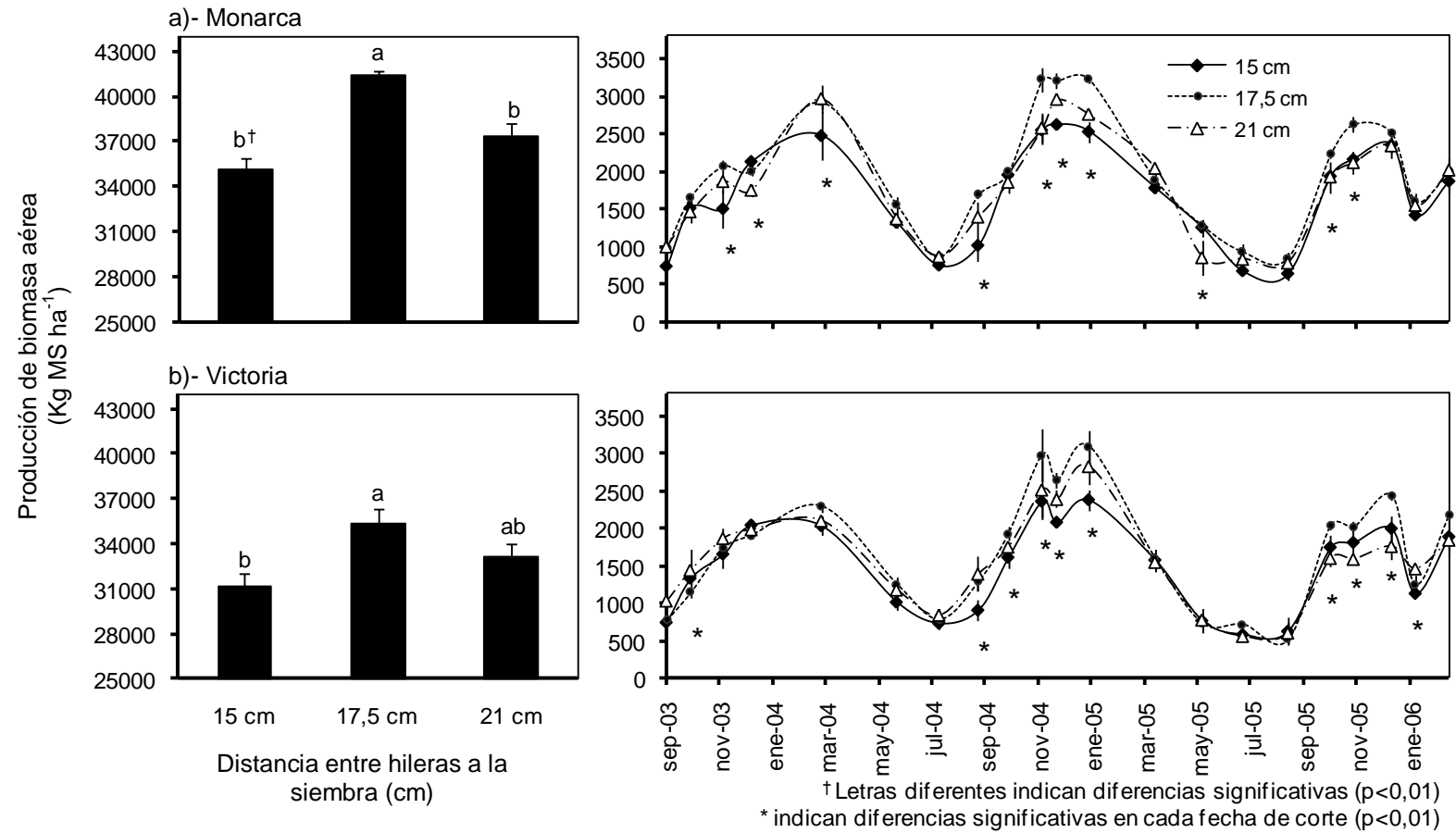
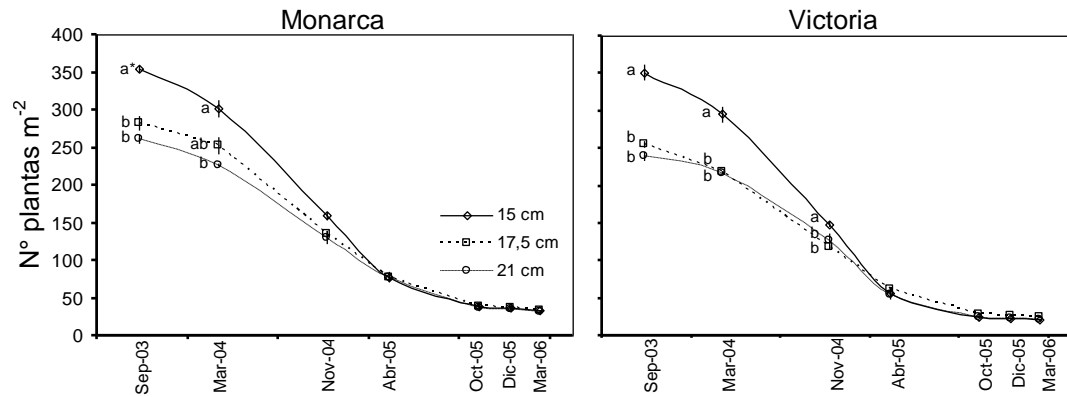
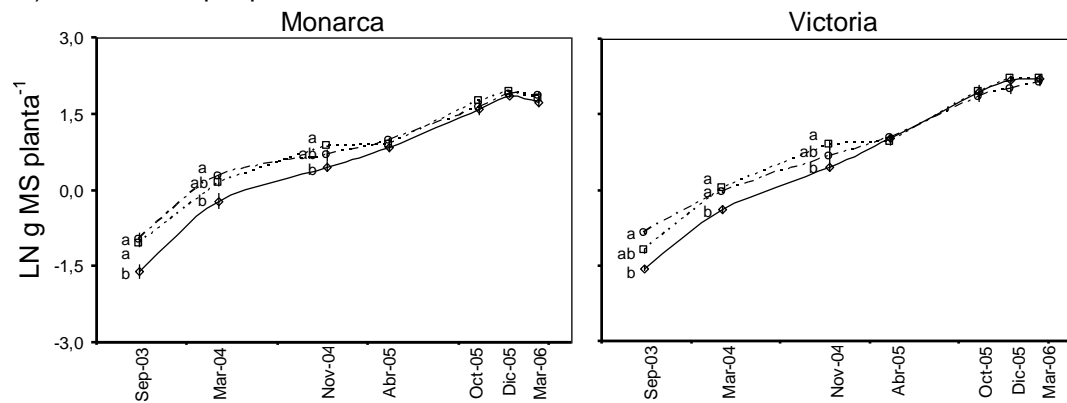


Figura 2.2. Producción de biomasa aérea total y por corte de cultivos puros de alfalfa durante tres años para cada cultivar: a) Monarca y b) Victoria para tres distancias entre hileras a la siembra (15 cm, 17,5 cm y 21 cm). Los valores son medias  $\pm$  ES de tres repeticiones.

## a)- Densidad de plantas



## b)- Peso aéreo por planta



\* Letras distintas indican diferencias significativas en cada fecha de medición ( $p < 0,01$ )

Figura 2.3. Efecto de la distancia entre hileras a la siembra sobre la dinámica de los componentes del rendimiento: a) la densidad de plantas y b) el LN del peso aéreo por planta, durante los tres años para los cultivares de alfalfa Monarca y Victoria para tres distancias entre hileras a la siembra (15 cm, 17,5 cm y 21 cm). Los valores son medias  $\pm$  ES de tres repeticiones.

### 2.3.3. Índice de rectangularidad

En términos generales, los valores de rectangularidad del canopeo se fueron acercando a la unidad en estrecha relación con la tasa de mortalidad de las plantas (comparar Figs. 2.3.a y 2.4.). Sin embargo, la rectangularidad aumentó marcadamente en relación con la distancia entre hileras a la siembra (Figura 2.4). Para ambos cultivares, las parcelas sembradas a mayor distancia (21 cm) presentaron un índice mayor con respecto a los demás tratamientos, indicando un arreglo espacial más rectangular durante la mayor parte del ensayo. No se encontraron diferencias significativas ( $p > 0,05$ ) entre las distancias de 15 cm y 17,5 cm hasta inicios del tercer año de cultivo.



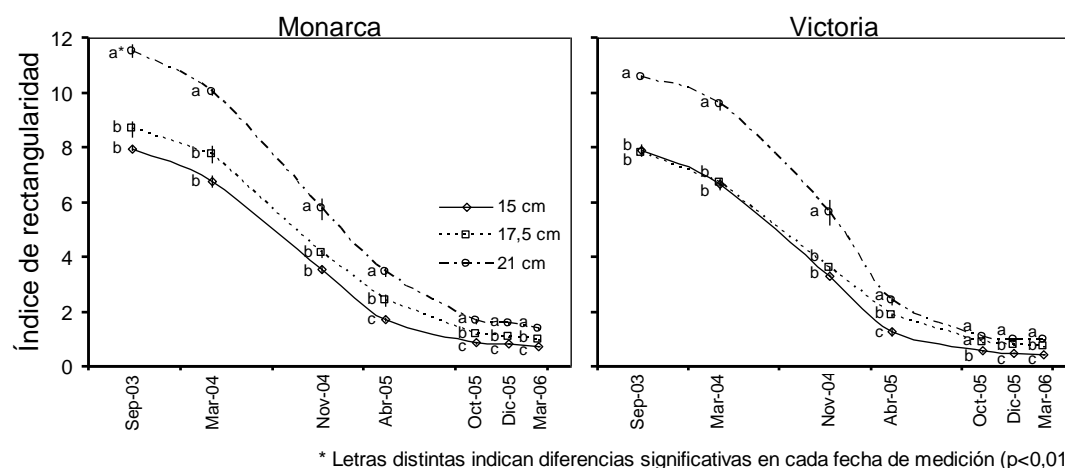


Figura 2.4. Efecto de la distancia entre hileras a la siembra sobre el índice de rectangularidad del arreglo espacial durante los tres años para los cultivares de alfalfa Monarca y Victoria para tres distancias entre hileras a la siembra (15 cm, 17,5 cm y 21 cm). Los valores son medias  $\pm$  ES de tres repeticiones.

## 2.4. DISCUSION

Los resultados del experimento muestran que la distancia entre hileras a la siembra intermedia (17,5 cm) alcanzó la mayor producción de forraje, debido a los incrementos registrados en los períodos de mayor tasa de crecimiento para el cultivo de alfalfa (primavera-verano). La respuesta fue similar en los dos cultivares evaluados y se manifestó tanto en veranos normales (2004-05) como en veranos secos (2005-06). Los resultados coinciden con lo reportado por Roufail (1975), donde las parcelas de alfalfa sembradas a menor distancia fueron las de mayor producción de biomasa. Sin embargo, en dicho estudio se probaron tratamientos muy contrastantes dentro de un rango más amplio: las distancias menores fueron siembra al voleo y 15 cm, seguidas por distancias de 30 cm y 45 cm. En nuestro experimento se analizó un rango más acotado de distancias, ubicado en el extremo inferior de lo evaluado por Roufail (1975). En nuestro estudio, los resultados muestran una respuesta de tipo óptimo para el cultivar Monarca, y una tendencia similar para el cultivar Victoria (Figura 2.2). Se propone que la producción de biomasa en la distancia intermedia (17,5 cm) se vio favorecida por dos mecanismos diferentes: una menor competencia intra-específica (Figura 2.3) y un arreglo espacial más cuadrado (Figura 2.4) que probablemente haya incrementado la interceptación de radiación por el canopeo.

En relación con el número de plantas logradas, se ha demostrado la existencia de interacciones competitivas entre plántulas desde estadios muy tempranos en el ciclo de producción de las pasturas (Skinner 2005). Esta situación explicaría la mayor densidad de plantas lograda a 15 cm de distancia en nuestro experimento (Figura 2.3), ya que al reducirse la distancia entre hileras se aumenta la distancia entre las semillas sembradas, reduciendo la competencia y pudiendo aumentar así la supervivencia de las plántulas. Roufail (1975) encontró un patrón similar partiendo de una misma densidad de siembra, ya que al cabo de 90 días las distancias más cercanas presentaban una densidad 90% superior en relación con las distancias más lejanas. Aunque en nuestro experimento, la menor densidad establecida a 17,5 cm vs. 15 cm permitió el desarrollo de plantas más grandes durante la mayor parte del experimento, que redundó en una mayor producción de forraje en la distancia intermedia (17,5 cm). El menor peso aéreo promedio por planta y la mayor tasa de mortalidad durante el segundo año del cultivo, sugieren que en

la distancia de 15 cm se estableció una jerarquía de tamaños (vigor) diferente al resto de los tratamientos, con una mayor proporción de plantas pequeñas suprimidas, que serían las que murieron durante el segundo año del cultivo. En ese sentido, es sabido que el proceso de mortandad denso-dependiente involucra siempre la muerte de las plantas más débiles (Harper 1977). Un efecto similar fue encontrado en pasturas de agropiro donde un mayor número de plantas establecidas en la distancia más cercana generó condiciones de mayor mortalidad tardía y menor producción de forraje (Bertram 2008). En nuestro experimento, si bien la dinámica de la densidad de plantas fue afectada por la distancia entre hileras a la siembra al inicio del ensayo, la posterior estabilización en una misma densidad durante el tercer año del ciclo del cultivo indicaría que la persistencia de la alfalfa no se vio modificada por los tratamientos.

En relación con la distribución de las plantas, el arreglo espacial más cuadrado registrado en la distancia entre hileras a la siembra intermedia (17,5 cm) en comparación con la de 21 cm explicaría su mayor acumulación total de forraje (Figuras 2.2 y 2.4). El índice de rectangularidad en la distancia de 21 cm fue mayor y más alejado de la unidad durante la mayor parte del experimento. Este arreglo espacial, al ser más rectangular presenta una distribución de las plantas menos equidistante, y por lo tanto se reduciría la intercepción de radiación del canopeo por el mayor espacio descubierto entre hileras durante cada uno de los rebrotes. Por otro lado, el índice de rectangularidad en la distancia de 17,5 cm fue similar al registrado en la distancia de 15 cm durante la mayor parte del experimento. Este resultado fue inesperado ya que de acuerdo al arreglo planteado al inicio del experimento, el tratamiento de 15 cm debería tender a un arreglo más cuadrado. Este resultado surge de la mayor densidad de plantas establecida en la distancia de 15 cm, lo cual redujo la distancia entre plantas en la misma hilera y generó el mismo arreglo espacial que a 17,5 cm. Esto permite suponer que la distancia de 15 cm no mejoró la intercepción de radiación en relación con la distancia intermedia.

En conclusión, en este trabajo la producción total de forraje en el cultivo de alfalfa se vio favorecida por la distancia intermedia de 17,5 cm, donde se combinaron características favorables en el arreglo espacial más cuadrado y en el peso aéreo de las plantas. La persistencia no se vio afectada por la distancia entre hileras a la siembra ya que el número de plantas al tercer año del cultivo fue similar entre todas las distancias. Si bien las variaciones en el distanciamiento fueron de poca magnitud, tuvieron un impacto significativo sobre la producción de biomasa para los dos cultivares evaluados. En relación con la hipótesis de trabajo planteada, se registró el aumento en la producción de biomasa aérea al acercar las hileras y formar un arreglo espacial más equidistante entre las plantas hasta la distancia de 17,5 cm. Por debajo de dicha distancia entre las hileras de siembra no se cumplió la hipótesis planteada, sin embargo, en la distancia de 15 cm ocurrieron procesos denso-dependientes distintos que afectaron el arreglo espacial (Figura 2.3.a), ya que no se logró una mejora en el arreglo con respecto a la distancia de 17,5 cm (Figura 2.4), y que podrían ser la causa de no haber encontrado la respuesta productiva esperada. La distancia de 17,5 cm combinó características favorables de un mayor peso aéreo por planta que la distancia de 15 cm en los primeros años del cultivo, y un arreglo espacial más cuadrado en relación con la distancia de 21 cm. Se propone que una menor competencia intra-específica y una mayor intercepción de radiación, respectivamente, serían parte de los mecanismos determinantes de las respuestas observadas. En el próximo capítulo se profundizan los mecanismos involucrados en cada caso, analizando los componentes del rendimiento de forraje con un mayor nivel de detalle y analizando los componentes del modelo ecofisiológico de aprovechamiento de la radiación.

### Capítulo 3: EFECTOS DE LA SIEMBRA A DIFERENTES DISTANCIAS ENTRE HILERAS, A DENSIDAD CONSTANTE, SOBRE LOS COMPONENTES DEL RENDIMIENTO Y EL APROVECHAMIENTO DE LA RADIACIÓN EN EL CULTIVO DE ALFALFA <sup>(2)</sup>

#### 3.1. INTRODUCCION

##### 3.1.1. Antecedentes

La distancia entre hileras a la siembra ha sido estudiada en numerosos experimentos con la aproximación ecofisiológica de aprovechamiento de la radiación incidente que contempla dos componentes: la cantidad de radiación fotosintéticamente activa interceptada durante el ciclo del cultivo ( $RAF_{ia}$ ) y su eficiencia de uso o conversión en biomasa (EUR) (Monteith 1977). Así en diversos cultivos, en relación con el primer componente mencionado, el acercamiento de las hileras permite aumentar la fracción de radiación fotosintéticamente activa interceptada ( $fRFA_i$ ) por el canopeo. Esta respuesta ha sido observada en cultivos para producción de granos como maíz (Barbieri *et al.* 2000; Andrade *et al.* 2002; Sharratt y McWilliams 2005), sorgo (Steiner 1986) y soja (Board *et al.* 1992a; Andrade *et al.* 2002), mientras que en girasol las diferencias en la  $fRFA_i$  se encontraron sólo en uno de dos años evaluados (Zaffaroni y Schneiter 1989). También en cultivos industriales como caña de azúcar (Singels y Smit 2009) y *Cannabis sativa* (van der Werf *et al.* 1995) se observó un aumento de la  $fRFA_i$  al disminuir la distancia entre hileras. La mayor interceptación de radiación se explica principalmente por las modificaciones en la disposición de las hojas debido al arreglo espacial, es decir la disposición más equidistante de las plantas determina una distribución de las hojas más uniforme en el espacio (Zaffaroni y Schneiter 1989; van der Werf *et al.* 1995; Flenet *et al.* 1996; Barbieri *et al.* 2000; Sharratt y McWilliams 2005). Se han reportado casos donde la disposición más equidistante de las plantas determinó un aumento en la cantidad de área foliar, y también a través de este mecanismo puede aumentar la  $fRFA_i$  en hileras cercanas (Steiner 1986; Board *et al.* 1992b; Singels y Smit 2009). Por otra parte, también se han encontrado resultados donde no se hallaron diferencias entre distanciamientos en la interceptación bajo condiciones en las cuales se superó el 95 % de  $fRFA_i$  tanto en hileras cercanas como en hileras más separadas (Maddonni *et al.* 2006).

El efecto de la distancia entre hileras a la siembra sobre la producción de biomasa y el rendimiento de los cultivos es determinado también por lo que ocurre en el segundo componente del modelo de Monteith, la EUR. De esta forma, aún cuando el acercamiento de las hileras permite en general un aumento en la interceptación de la radiación, el efecto sobre la producción de biomasa y el rendimiento es variable asociado a como se afecta la EUR. En maíz, soja y girasol las respuestas positivas en rendimiento de grano se asociaron a incrementos en la radiación interceptada durante el período crítico de determinación del rendimiento (Andrade *et al.* 2002), no obstante el aumento en el rendimiento fue menos que proporcional al aumento en interceptación de radiación sugiriendo menores EUR en distancias cercanas. En sojas tardías el acercamiento de las hileras aumentó la interceptación de radiación desde etapas

---

<sup>(2)</sup> Mattera J, Romero LA, Cuatrín AL, Cornaglia PS, Grimoldi AA (2010) Distancia de siembra en alfalfa: influencia sobre producción de biomasa y componentes del rendimiento. Resumen aceptado 33° Congreso Argentino de Producción Animal, Octubre 2010 Viedma, Rio Negro.

tempranas del cultivo, y también aumentó el rendimiento hasta la distancia de 50 cm (Board *et al.* 1992a), pero en distancias menores (25 cm) a pesar de la mejora en  $RAF_{ia}$  el rendimiento disminuyó por una menor EUR. También en maíz, la caída de la EUR en post-floración contrarrestó los efectos positivos de una mayor  $RAF_{ia}$  en hileras cercanas (Maddonni *et al.* 2006). Los mecanismos que explican la reducción en la EUR en distancias cercanas se encuentran aún bajo estudio. Maddonni *et al.* (2006) proponen que en distancias cercanas la menor penetración de la luz en el canopeo y la menor relación rojo/rojo lejano que recibieron las hojas de estratos inferiores habrían reducido la fotosíntesis y en consecuencia la EUR. Si bien Board *et al.* (1994) plantea las mismas posibles explicaciones sus resultados no las avala, ya que no encuentra diferencias en la penetración de la luz en el canopeo, y opuestamente, la relación rojo/rojo lejano es mayor en distancias cercanas. Por último, un tercer componente que puede ser afectado por la distancia entre hileras a la siembra cuando se estudia el rendimiento en grano es la partición de los fotoasimilados a estructuras reproductivas. Por ejemplo, en sorgo pese a que en hileras más cercanas la radiación interceptada y la producción de biomasa fue mayor no se registró un incremento en el rendimiento en grano por una caída en el índice de cosecha (Steiner, 1986). En este caso, la caída en el índice de cosecha se relacionó con un mayor uso del agua durante etapas vegetativas y una menor evapotranspiración durante el llenado de los granos.

La información disponible acerca del efecto del distanciamiento en pasturas perennes es más escasa que en cultivos agrícolas y presenta en muchos casos la limitante de que los trabajos se realizaron sin analizar los componentes del rendimiento ni tampoco con la aproximación ecofisiológica del aprovechamiento la radiación, lo cual implica que no se profundiza en los mecanismos que serían determinantes de las respuestas encontradas. Los antecedentes existentes de aumentos de la producción de biomasa por acercar las hileras de siembra, tanto en pasturas puras de alfalfa (Roufail A. 1975; Lutz y Morley 1982) como asociadas con gramíneas (Jefferson y Kielly 1998) en ningún caso han sido analizados en términos del aprovechamiento de la radiación. Existen antecedentes de experiencias realizadas en la Argentina que estudiaron indirectamente el componente de intercepción del modelo de radiación. Esto fue así en intersiembra de alfalfa sobre pasturas degradadas donde encontraron una mayor producción de biomasa de alfalfa en el primer corte en el distanciamiento más cercano (10 cm) asociada a un incremento del IAF (Colabelli *et al.* 2002) lo cual permite suponer que la cantidad de radiación interceptada fue mayor. También en el período de implantación del cultivo de alfalfa la cobertura área, medida mediante fotografías, aumentó más rápidamente en distancias cercanas (Cornaglia *et al.* 2005). Por último, en el experimento descrito en el capítulo dos de esta tesis (Capítulo 2, Mattera *et al.* 2009) durante tres años de vida del cultivo de alfalfa se observaron efectos positivos del acercamiento hasta los 17,5 cm asociado a un arreglo espacial más equidistante entre las plantas, sugiriendo que la respuesta se debió a una mayor intercepción de radiación. Por otra parte, en otra especie forrajera perenne como el agropiro el uso de un diseño de siembra cruzado (efecto similar al producido por el acercamiento de las hileras), en un año con restricción hídrica, no afectó la intercepción de radiación, pero si redujo la producción de biomasa por un efecto negativo sobre la EUR (Bertram 2008).

De esta forma los datos disponibles en pasturas de alfalfa sugieren que el acercamiento de las hileras permitiría aumentar el componente de intercepción del modelo de radiación de Monteith. En relación con el otro componente del modelo de radiación, las disminuciones en la EUR reportadas previamente en otros cultivos ocurrieron en etapas más bien avanzadas de los cultivos, con altos valores de IAF, y considerando que las pasturas de alfalfa se manejan bajo sistemas de corte relativamente

frecuente no se esperan cambios importantes en la EUR por efecto de la distancia entre hileras a la siembra. Esto podría ser distinto si la modificación de la distancia entre hileras a la siembra generara cambios en el canopeo de una magnitud que lleguen a afectar procesos que inciden sobre la EUR, *e.g.* senescencia foliar y distribución del nitrógeno en la planta.

El experimento planteado en este capítulo presenta la ventaja de analizar el efecto de la distancia entre hileras a la siembra sobre la producción de forraje considerando las aproximaciones de los componentes del rendimiento (Volenec *et al.* 1987) y de los componentes ecofisiológicos del modelo de radiación (Monteith 1977) en varios rebrotes de alfalfa sin presencia de malezas. Se estudió la dinámica de los componentes del rendimiento para analizar posibles compensaciones entre componentes, y también para abordar la complejidad que existe en este tipo de cultivos donde la competencia intra-específica provoca la muerte de plantas. Se estudió el efecto sobre los componentes del modelo de radiación para analizar los mecanismos ecofisiológicos involucrados. Se estudió un amplio rango de distancias entre hileras a la siembra con un control inicial de la densidad de plantas de forma tal de asegurar un gradiente en el arreglo espacial de las plantas definido como el índice de rectangularidad. Este trabajo en el cultivo de alfalfa es relevante ya que colabora a una mayor comprensión de las consecuencias de modificar una práctica agronómica, que es definida por el productor y también por las características de las sembradoras disponibles, y que incide en el logro de pasturas más productivas aprovechando más eficientemente los recursos disponibles en el ambiente.

### 3.1.2. Objetivo

Evaluar el efecto de la siembra a diferentes distancias entre hileras, a densidad constante, sobre la acumulación de biomasa aérea y su relación con los componentes del rendimiento y el aprovechamiento de la radiación.

### 3.1.3. Hipótesis (ídem Sección 1.3)

- a. Al disminuir la distancia entre hileras a la siembra se generan arreglos espaciales más cuadrados que aumentan la producción de biomasa aérea en el cultivo de alfalfa.
- b. El número y peso de tallos es mayor a menor distancia entre hileras a la siembra por una menor competencia intra-específica.
- c. La  $RFA_{ia}$  durante el rebrote es mayor a menor distancia entre hileras a la siembra. Este arreglo espacial permite alcanzar antes el IAF crítico y aumentar el tiempo transcurrido durante el rebrote con intercepción óptima.
- d. La distancia entre hileras a la siembra no afecta la EUR dentro del rango de biomasa comúnmente explorado por cultivos de alfalfa destinados a la producción de forraje.

## 3.2. MATERIALES Y METODOS

### 3.2.1. Sitio de estudio

El experimento de campo fue llevado a cabo durante el año 2009 en la EEA INTA-Rafaela (31°12' Latitud S. ; 61°30' Longitud O.) en el Centro-Oeste de la Prov. de Santa Fe. El clima de la región es sub-húmedo húmedo y mesotermal. El experimento se llevo a cabo en un lote con suelo Argiudol típico Serie Rafaela (Mosconi *et al.* 1981). Previo al momento de la siembra se efectuó un muestreo del suelo hasta una profundidad de 15 cm. El mismo presentó un contenido de materia orgánica de 3,42% (Walter & Black micro), 0,19% de nitrógeno total (Kjeldahl), 36,8 ppm de N-nitratos (Harper mod.), 67,6 ppm de fósforo (Bray y Kurtz 1), 9 ppm de azufre de sulfatos (Turb.) y 6,3 de pH (en agua).

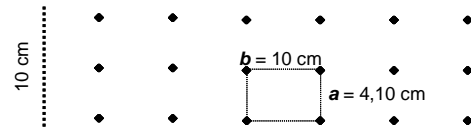
### 3.2.2. Tratamiento y diseño experimental

Se utilizó el cultivar Monarca (sin reposo invernal), con un peso de 1000 semillas de  $2,34 \pm 0,04$  gramos y un poder germinativo de  $92,5 \pm 0,02$  %. Las semillas no fueron inoculadas, ya que en el lote se realizan frecuentemente ensayos de alfalfa y la presencia de poblaciones de *Sinorhizobium meliloti* naturalizadas fue observada en reiteradas oportunidades.

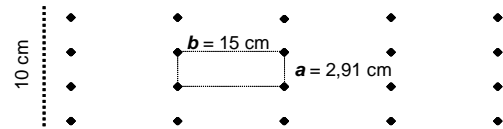
El diseño experimental fue de bloques completos al azar con cinco repeticiones. Se evaluaron cinco distancias entre hileras a la siembra: 10 cm, 15 cm, 17,5 cm, 20 cm y 30 cm (Figura 3.1). De forma similar al ensayo previo (Capítulo 2, Mattera *et al.* 2009) se evaluaron las distancias de acuerdo con las tendencias observadas en los equipos disponibles para la siembra de pasturas, pero adicionalmente se agregaron dos distancias más contrastantes (10 y 30 cm). Cada unidad experimental consistió en una parcela de 1,5 m por 1 m. Se estableció por lo tanto una cantidad diferentes de hileras por parcela según el distanciamiento: 12, 9, 8, 7 y 5 hileras parcela<sup>-1</sup> en las distancias de 10 cm, 15 cm, 17,5 cm, 20 cm y 30 cm, respectivamente. Las parcelas fueron sembradas con alta densidad y luego en el mes de mayo se realizó un raleo de plántulas llevando todas las parcelas a una misma densidad de 250 plantas m<sup>-2</sup>. Posterior al raleo, durante el mes de julio se instalaron dos marcos permanentes por parcela que delimitaron tramos lineales de la hilera de siembra en los cuales se marcaron las bases de las plantas con anillos.

El terreno se preparó mediante labranza convencional con dos labores de rastra de discos y una labor con rastra de dientes. El experimento fue sembrado a mano a principios del otoño de 2009. Las precipitaciones alrededor de la siembra fueron suficientes para asegurar una buena implantación de la pastura (358 mm en los meses de febrero, marzo y abril). El ensayo se mantuvo libre de malezas por remoción manual de las mismas. Se aplicaron pesticidas para controlar enfermedades e insectos. Las lluvias durante el período experimental fueron abundantes totalizando 770 mm desde septiembre a inicios de febrero. Cuando fue necesario se aplicaron riegos suplementarios para evitar estrés hídrico severo.

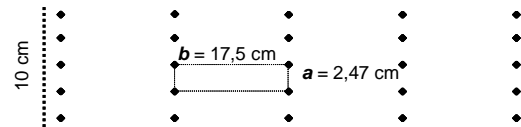
a)- Distancia de 10 cm



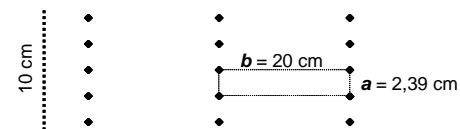
b)- Distancia de 15 cm



c)- Distancia de 17,5 cm



d)- Distancia de 20 cm



e)- Distancia de 30 cm

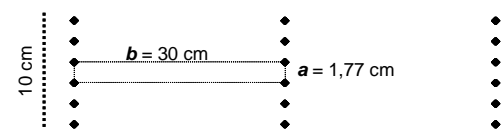


Figura 3.1. Imagen del canopeo generado en cada distancia entre hileras a la siembra: a)- 10 cm, b)- 15 cm, c)- 17,5 cm, d)- 20 cm, y e)- 30 cm, y el respectivo esquema del arreglo espacial de plantas, confeccionado a partir de la distancia promedio entre plantas dentro de la hilera al comienzo del período experimental (septiembre). La separación entre plantas dentro de la hilera está representada por la letra  $a$ , en tanto que la letra  $b$  identifica la separación entre las hileras.

### 3.2.3. Mediciones

#### 3.2.3.1. Densidad de plantas e índice de rectangularidad

Se registró la dinámica del número de plantas, a través del seguimiento de las plantas marcadas en su base con anillos sobre dos tramos marcados de diferente

longitud (marcos permanentes), representando una misma superficie (66 cm, 44 cm, 38 cm, 33 cm y 22 cm de longitud en las distancias de 10 cm, 15 cm, 17,5 cm, 20 cm y 30 cm, respectivamente). Debido al recambio de tallos existente se fueron manteniendo los anillos de cada planta sobre los tallos vivos. Los recuentos de plantas se hicieron en cuatro momentos, en los rebrotes de septiembre, octubre y diciembre, y luego del último corte, en febrero de 2010, se excavó las bases de las plantas marcadas registrando el número final de coronas. Para caracterizar el arreglo espacial resultante en cada tratamiento se midió la distancia entre plantas en la misma hilera dentro de los marcos permanentes y se calculó el índice de rectangularidad como el cociente entre la distancia entre hileras y la distancia promedio entre plantas en la hilera (Willey y Heath 1969). Se estudió la dinámica del índice durante el ensayo teniendo en consideración los cambios ocurridos en la densidad de plantas.

### 3.2.3.2. Producción de biomasa aérea.

Se evaluó la producción en seis rebrotes consecutivos, incluyendo al primer corte de la pastura luego del período de implantación (fecha de corte: 31/08) y los cinco rebrotes subsiguientes durante la primavera y el verano (fechas de corte para el rebrote de septiembre: 14/10, rebrote de octubre: 09/11; rebrote de noviembre: 14/12, rebrote de diciembre: 10/01, y rebrote de enero: 10/02). Los cortes se efectuaron cuando la alfalfa alcanzó el estado de floración (entre floración temprana y tardía). La producción de biomasa se midió sobre una misma superficie, para lo cual se cortaron cuatro tramos de hileras de diferente longitud en cada distancia (ver longitudes arriba en sección 3.2.3.1.). Los cortes se realizaron con tijera a una altura de 7 cm evitando los bordes de cada parcela. La biomasa cortada fue secada en estufa (60°C) durante 48 h. Los valores se convirtieron a materia seca y se estandarizaron a una misma unidad de superficie ( $m^2$ ).

### 3.2.3.3. Componentes del rendimiento: Densidad de plantas, tallos por planta, número de tallos y peso por tallo.

La densidad de plantas se evaluó de acuerdo a lo descrito en el ítem 3.2.3.1 contando el número de plantas marcadas en cuatro momentos a lo largo del período experimental. Sobre la biomasa cortada en los rebrotes de septiembre, octubre, diciembre y enero se contó el número de tallos, y como el cociente entre ambos se calculó el peso promedio por tallo. Los recuentos de plantas y tallos fueron posteriormente estandarizados a una misma unidad de superficie ( $m^2$ ). El número de tallos por planta se estimó como el cociente entre número de tallos y número de plantas.

### 3.2.3.4. Características estructurales de las plantas: Relación hoja:tallo y jerarquías de los tallos por altura

Como un indicador de la calidad del forraje se estimó la relación hoja:tallo para lo cual se separaron hojas y tallos sobre una submuestra del material cortado en los rebrotes de septiembre, octubre, diciembre y enero. Por otra parte, con el objeto de analizar si la distancia entre hileras a la siembra afectó la distribución de la biomasa entre jerarquías de tallos en estos mismos rebrotes sobre una submuestra de biomasa los tallos cortados se dividieron en tres categorías de altura (sensu Teixeira *et al.* 2007a) en relación al tallo más largo ( $H_{m\acute{a}x}$ ), siendo clasificados en dominantes ( $>0,67 H_{m\acute{a}x}$ ), intermedios ( $0,33 \geq H_{m\acute{a}x} \geq 0,67$ ) y suprimidos ( $<0,33 H_{m\acute{a}x}$ ). Se calculó la proporción de la biomasa en cada categoría.



### 3.2.3.5. Aprovechamiento de la radiación

Se estudió el aprovechamiento de la radiación durante los cinco rebrotes posteriores al primer corte de la pastura. En el transcurso de los mismos periódicamente se midió la radiación incidente sobre el canopeo y la fracción de la radiación transmitida a través del mismo ( $fRFA_t$ ) con una barra medidora del flujo de fotones (Cavadevices, Buenos Aires, Argentina) de 12:30 a 13:30 h., preferentemente en días despejados. La  $fRFA_t$  por el canopeo se midió ubicando la barra medidora al nivel del suelo en sectores homogéneos en cada parcela en forma perpendicular a las hileras, centrada en relación con las mismas. La fracción de la radiación interceptada por el canopeo ( $fRFA_i$ ) se calculó como el cociente entre  $(1 - fRFA_t)$  y la radiación incidente, expresando su evolución en el tiempo en cada rebrote utilizando el concepto de tiempo térmico con una temperatura base de 5°C (Fick *et al.* 1988). Por interpolación lineal entre mediciones se estimaron las  $fRFA_i$  diarias. La RFA incidente se obtuvo a partir de la radiación global incidente registrada in situ mediante la estación meteorológica de la EEA INTA-Rafaela afectada luego por el coeficiente de 0,45. Se calculó la  $RFA_{ia}$  durante cada rebrote como la sumatoria de la RFA incidente de cada día multiplicada por la  $fRFA_i$  correspondiente. Por otra parte, se estimó la EUR como el cociente entre la producción de biomasa y la  $RFA_{ia}$  para cada rebrote. LA EUR de cada distancia para todo el período experimental (EUR global) se estimó como el cociente entre la sumatoria de la producción de biomasa y la sumatoria de la  $RFA_{ia}$  en los cinco rebrotes. Adicionalmente, se estimó la EUR para cada distancia como la pendiente de la acumulación de producción de biomasa y de  $RFA_{ia}$  durante todo el período experimental.

### 3.2.3.6. Índice de área foliar y coeficiente de extinción de luz

Con el objeto de conocer si la distancia entre hileras a la siembra afectó el IAF, que es un atributo de la estructura del canopeo que afecta la intercepción de radiación, se realizaron muestreos en los rebrotes de diciembre y enero. Antes de realizar el corte se recolectaron muestras biomasa de cada parcela, sobre las mismas se separaron las láminas de los tallos, midiendo el área foliar y su respectivo peso seco (balanza de precisión; error = 0,1 mg). Luego se calculó el área foliar específica que fue multiplicada por la biomasa total y por la proporción de lámina para obtener el IAF. Adicionalmente, se estimó para estos rebrotes el coeficiente de extinción lumínica ( $k$ ) calculado como:  $k = - \text{LN} (fRFA_t) / \text{IAF}$  (Flenet *et al.* 1996).

### 3.2.3.7. Contenido de clorofila en hojas de distintos estratos

Diferencias en la atenuación de la luz en el canopeo podrían afectar el contenido de N y los niveles de fotosíntesis en las hojas de diferentes estratos. En los rebrotes de diciembre y enero antes de realizar el corte se midió en cada parcela el contenido de clorofila en hojas con el medidor SPAD-Minolta como una medida indirecta de los niveles de nitrógeno en distintos estratos. Se midió en tres estratos en función de la altura promedio de todas las parcelas en el día de medición (60 cm y 45 cm para diciembre y enero, respectivamente). En cada estrato se midió el valor de SPAD en 15 hojas al azar en distintas plantas.

### 3.2.3.8. Peso por corona, área por corona y diámetro superior de la raíz pivotante

Al finalizar el período experimental (inicios de febrero de 2010) se extrajeron las coronas en uno de los marcos permanentes presentes en cada parcela con el objetivo de analizar si las diferencias en el arreglo espacial generaron cambios estructurales en las coronas. Las mismas fueron secadas por 96 h. en estufa a 60°C registrando el peso seco

de cada corona, el área de la corona estimada en función del diámetro mayor y el respectivo diámetro perpendicular, y por último el diámetro superior de la raíz pivotante.

### 3.2.4. Análisis estadístico

La dinámica de la producción de biomasa aérea, la densidad de plantas, el índice de rectangularidad, los componentes del rendimiento y la relación hoja:tallo se analizaron en un diseño de bloques completos al azar y medidas repetidas en el tiempo (rebrote). Para los análisis se utilizó el procedimiento MIXED del paquete estadístico SAS v9.1.3 (SAS Institute, Cary, NC. 2004). Se realizaron contrastes polinomiales para evaluar la existencia de tendencias lineales y cuadráticas en los valores medios de cada variable en función de la distancia entre hileras a la siembra. Los coeficientes para calcular los contrastes se obtuvieron por medio del proc IML del paquete estadístico SAS v9.1.3 (SAS Institute, Cary, NC. 2004). Para las variables índice de rectangularidad y relación hoja:tallo se hicieron transformaciones con el LN para cumplir los supuestos del análisis. Para las variables analizadas sólo en los rebrotes de diciembre y enero (IAF,  $k$  y clorofila) se efectuaron análisis de la varianza para cada rebrote por separado con un diseño en bloques completos al azar con el proc GLM del paquete estadístico SAS v9.1.3 (SAS Institute, Cary, NC. 2004). Debido a la pérdida de dos parcelas en uno de los bloques se utilizó la SC tipo III que estima los valores faltantes. Para los atributos de las coronas se realizó un análisis de la varianza con un diseño en bloques ( $n=4$ : bloques sin datos faltantes) con submuestreo (cada planta). Las variables peso y área por corona fueron transformadas por el LN para cumplir los supuestos del análisis. Adicionalmente, los análisis de regresión y las correlaciones entre las variables evaluadas se realizaron mediante el paquete estadístico InfoStat v. 2009 (Di Rienzo *et al.* 2011). Con el objeto de comparar las pendientes entre la acumulación de biomasa y de  $RFA_{ia}$  durante todo el período experimental, es decir la EUR, se utilizó la prueba de paralelismo y coincidencia (Pontaque, 2005) con el procedimiento GLM del paquete estadístico SAS v9.1.3 (SAS Institute, Cary, NC. 2004). Para el ajuste de la regresión bi-lineal de la producción de la biomasa aérea se usó el paquete estadístico GraphPad Prism v.5.00 (GraphPad Software, San Diego California USA, [www.graphpad.com](http://www.graphpad.com)).

## 3.3. RESULTADOS

### 3.3.1. Índice de rectangularidad

El índice de rectangularidad se vio afectado por la distancia entre hileras a la siembra ( $p<0,0001$ ) (Figura 3.2), siendo gradualmente más cercano a la unidad al acercar las hileras de siembra, implicando un arreglo más equidistante entre plantas. Al realizar regresiones lineales entre la distancia entre hileras a la siembra y el LN del índice de rectangularidad para cada recuento, los coeficientes de determinación fueron elevados (entre 89% y 93%), confirmando la estrecha relación entre las dos variables durante este experimento. La interacción de la fecha del recuento con la distancia entre hileras a la siembra no fue significativa ( $p=0,86$ ). Por los cambios que fueron ocurriendo en la densidad de plantas se registraron disminuciones significativas ( $p<0,0001$ ) del índice de rectangularidad en los recuentos de diciembre y febrero. Esto quiere decir que la mortalidad de plantas en todas las distancias determinó que en los

últimos recuentos el índice de rectangularidad disminuyera, y si bien se observó una disminución más acentuada en la distancia de 30 cm, se mantuvieron las posiciones relativas de cada distancia corroborando así el gradiente de arreglo espacial requerido para poder estudiar las hipótesis planteadas durante todo el período experimental.

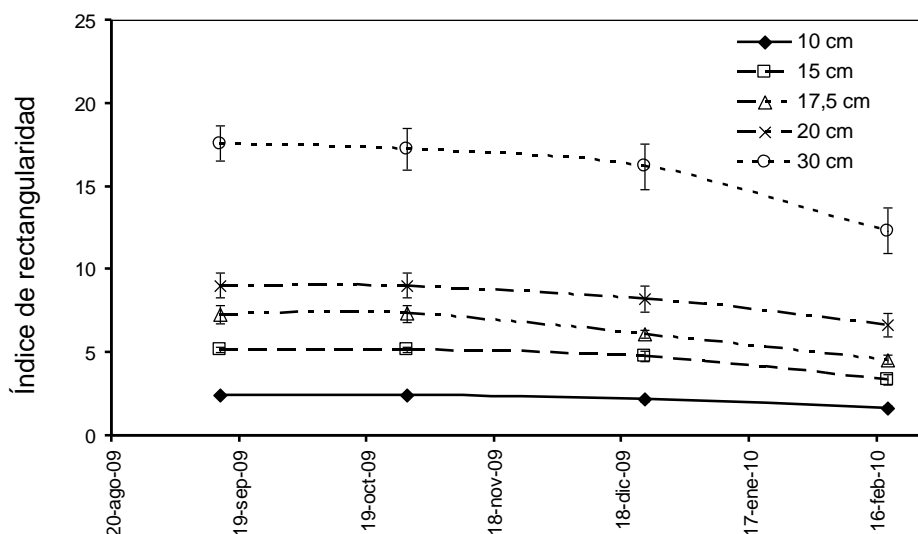


Figura 3.2. Efecto de la distancia entre hileras a la siembra sobre el índice de rectangularidad del arreglo espacial para el cultivar de alfalfa Monarca, durante la primavera-verano del primer año de vida, para cinco distancias entre hileras a la siembra (10 cm, 15 cm, 17,5 cm, 20 cm y 30 cm). Las parcelas fueron raleadas en post-emergencia para uniformar la densidad de plantas  $\text{m}^{-2}$ . Los valores son medias  $\pm$  ES de cinco repeticiones.

### 3.3.2. Producción de biomasa aérea

La producción de biomasa aérea fue afectada por la distancia entre hileras a la siembra ( $p < 0,001$ ) (Figura 3.3) con una tendencia lineal significativa a aumentar la producción al acercar las hileras ( $p < 0,01$ ). En promedio para los seis rebrotes evaluados la distancia con el valor de producción más elevado fue 15 cm, aprox. en un 40% superior que la distancia menos productiva de 30 cm entre hileras. Se ajustó una regresión bi-lineal para representar la relación entre la distancia entre hileras a la siembra y la producción de total de biomasa con la finalidad de reflejar la ocurrencia de una distancia entre hileras óptima alrededor de los 15 cm (Figura 3.4). Esta función se caracterizó por tener una mayor reducción de la producción hacia distancias más espaciadas que hacia distancias más cercanas (mayor pendiente) y explicó el 63% de la variación en la producción de biomasa.

Como era de esperarse la producción también fue afectada por el rebrote ( $p < 0,0001$ ), pero no hubo una interacción significativa entre ambos ( $p = 0,37$ ). En noviembre se halló la mayor producción ( $438 \text{ g MS m}^{-2}$ ) que fue 86% mayor que la menor, correspondiente al mes de enero ( $236 \text{ g MS m}^{-2}$ ). Esta producción más alta en noviembre pudo haberse debido en parte a que se retrasó el corte hasta un estado de floración más avanzado que en el resto de los rebrotes.

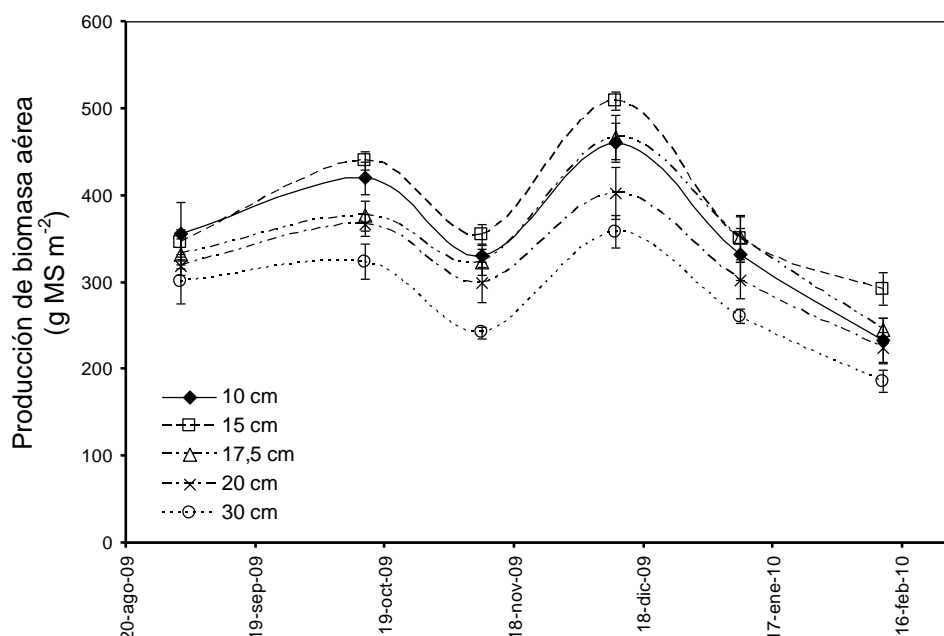


Figura 3.3. Producción de biomasa aérea por corte de cultivos puros de alfalfa (cultivar Monarca), durante la primavera-verano del primer año de vida, para cinco distancias entre hileras a la siembra (10 cm, 15 cm, 17,5 cm, 20 cm y 30 cm). Las parcelas fueron raleadas en post-emergencia para uniformar la densidad de plantas  $\text{m}^{-2}$ . Los valores son medias  $\pm$  ES de cinco repeticiones.

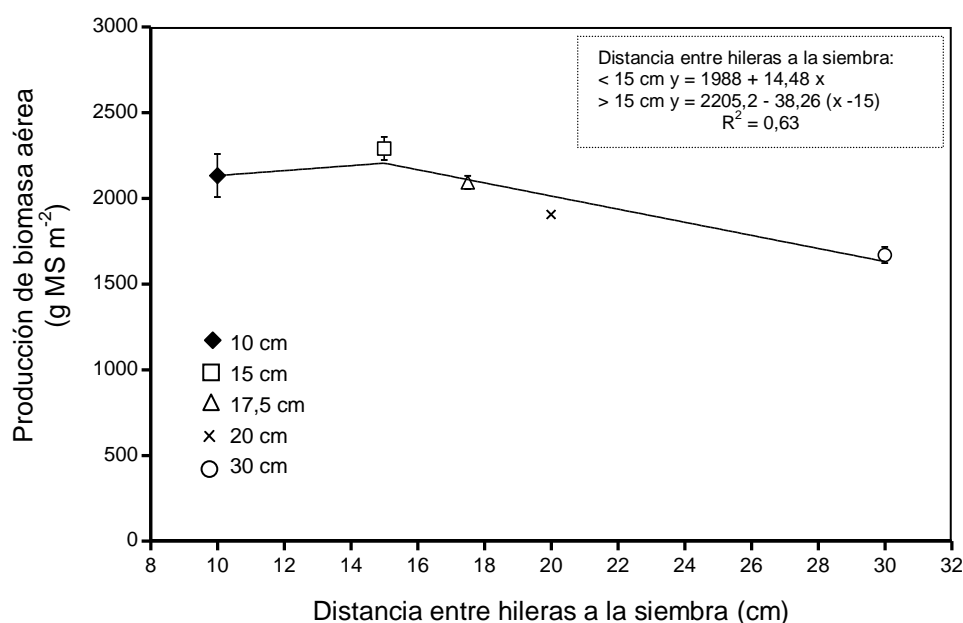


Figura 3.4. Producción de biomasa aérea total acumulada (suma de seis cortes) de cultivos puros de alfalfa (cultivar Monarca) en función de la distancia entre hileras a la siembra, durante la primavera-verano del primer año de vida. Las parcelas fueron raleadas en post-emergencia para uniformar la densidad de plantas  $\text{m}^{-2}$ . Los valores son medias  $\pm$  ES de cinco repeticiones.

### 3.3.3. Componentes del rendimiento: Densidad de plantas, tallos por planta, peso por tallo, y número de tallos.

La dinámica de la densidad de plantas fue afectada por la distancia entre hileras a la siembra ( $p < 0,01$ ) (Cuadro 3.1, Figura 3.5.a). Se observó una tendencia lineal significativa en relación con la distancia, indicando una mayor densidad de plantas al acercar las hileras, aun habiendo partido de un mismo número de plántulas (raleo). El caso extremo fue el de la distancia de 30 cm, con una disminución promedio de aprox. 20%. Al ajustar regresiones lineales se observó que la distancia entre hileras a la siembra explicó entre el 15 y el 50% de la variación en la densidad de plantas (Figura 3.5.a), siendo más explicativa de lo que ocurrió en los rebrotes de primavera que en los rebrotes del verano. El paso del tiempo también tuvo un efecto sobre la densidad de plantas ( $p < 0,0001$ ), aunque sin interaccionar con la distancia entre hileras a la siembra, encontrando una reducción a partir del tercer recuento (diciembre) de aprox. el 10%, que luego se vio acentuada en el recuento posterior (febrero), con una reducción promedio del 26%.

El componente tallos planta<sup>-1</sup> no fue afectado por el distanciamiento (Cuadro 3.1, Figura 3.5.b). Se observó un efecto del rebrote, ya que al avanzar la edad de la pastura, aumentó el número de tallos por planta, y se correlacionó con la disminución en la densidad de plantas ( $R = -0,66$ ;  $p < 0,0001$ ).

El componente número de tallos por unidad de superficie, que integra los dos componentes antes mencionados, número de plantas y tallos por planta, se halló que fue afectado significativamente por la distancia entre hileras a la siembra con una tendencia lineal significativa a aumentar el número al acercar las hileras (Cuadro 3.1). En todos los rebrotes se ajustaron regresiones lineales significativas en las cuales la distancia entre hileras a la siembra explicó entre el 35% y 61% de la variación existente en el número de tallos (Figura 3.5.c). El rebrote también tuvo un efecto significativo sobre este componente, aunque en este caso el mayor número de tallos no estuvo relacionado con la edad de las pasturas pero sí con el nivel productivo, es decir mayor número de tallos en los rebrotes donde se acumuló mayor cantidad de biomasa.

Por último, para el componente peso tallo<sup>-1</sup> el análisis de la varianza no detectó un efecto significativo del distanciamiento (Cuadro 3.1, Figura 3.5.d). También el rebrote afectó a este componente, y cómo en el número de tallos, se observó que en los rebrotes más productivos el peso por tallo fue mayor.

Cuadro 3.1. Análisis de la varianza y contrastes de tendencias para el efecto de la distancia entre hileras a la siembra y el rebrote sobre los componentes del rendimiento: densidad de plantas, tallos por planta, peso por tallo y número de tallos, para el cultivar de alfalfa Monarca, durante la primavera-verano del primer año de vida.

	Densidad de plantas m <sup>-2</sup>	Nº tallos planta <sup>-1</sup>	Peso tallo <sup>-1</sup>	Nº tallos m <sup>-2</sup>
	----- Valores P -----			
ANOVA				
Bloque	0,06	0,16	0,13	0,93
Distancia	<0,01	0,76	0,09	<0,01
Rebrote	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Interacción	0,07	0,27	0,96	0,88
Contrastes distancias				
Lineal	<0,001	0,60	0,38	<0,001
Cuadrático	0,26	0,88	0,15	0,64

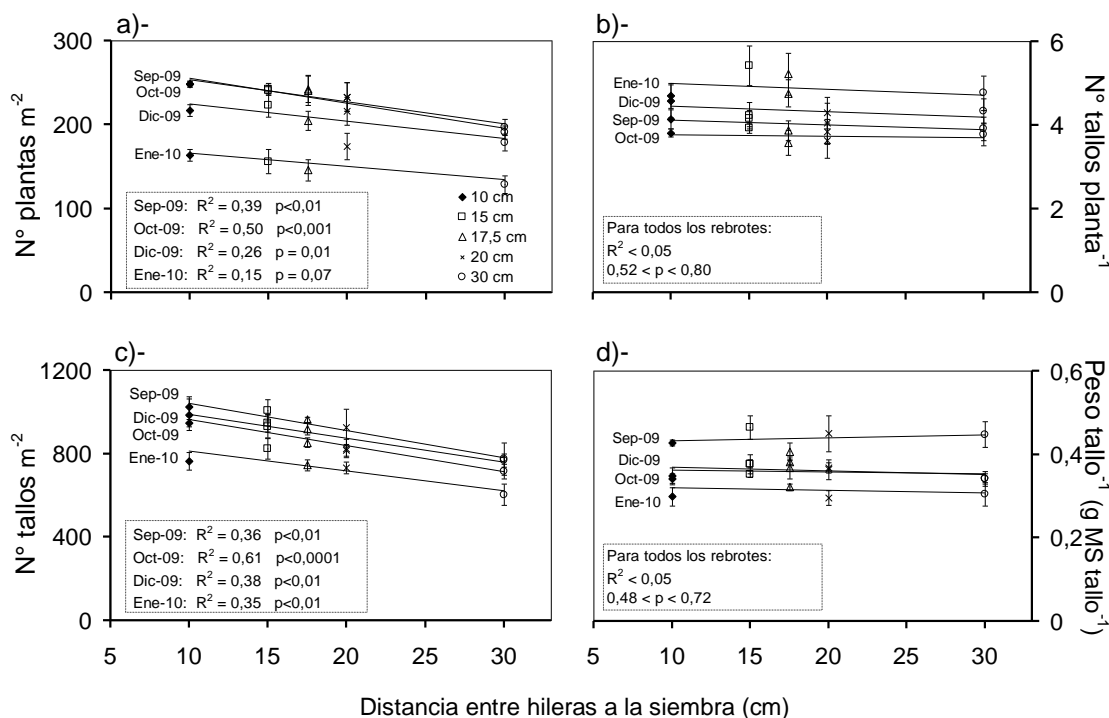


Figura 3.5. Componentes del rendimiento en función de la distancia entre hileras a la siembra para cada rebrote: a)- Densidad de plantas, b)- Número de tallos por planta, c)- Número de tallos  $m^{-2}$ , d)- Peso por tallo, para el cultivar de alfalfa Monarca, durante la primavera-verano del primer año de vida. Las parcelas fueron raleadas en post-emergencia para uniformar la densidad de plantas  $m^{-2}$ . Los valores son medias  $\pm$  ES de cinco repeticiones para cuatro rebrotes (septiembre, octubre, noviembre y diciembre).

Al relacionar los distintos componentes del rendimiento con la producción de biomasa aérea, se encontró que los componentes que presentaron correlaciones lineales positivas significativas fueron la densidad de plantas, el número de tallos  $m^{-2}$  y el peso por tallo (Figura 3.6). De esta forma, la asociación del número de plantas y tallos con la producción, permite deducir que el aumento en el número de estos componentes al acercar la distancia entre hileras a la siembra (Figura 3.5) fue responsable del aumento en la producción de biomasa. La producción de biomasa se asoció más fuertemente con el número de tallos  $m^{-2}$  que con la densidad de plantas (mayor R), de todas formas existió una asociación positiva entre ambas variables ( $R = 0,61$ ;  $P < 0,0001$ ) indicando que no hubo compensaciones entre ellas. Por otra parte, la asociación del número de tallos  $m^{-2}$  con el peso por tallo si bien fue positiva fue de menor magnitud ( $R = 0,27$ ;  $P = 0,01$ ) y también indica la ausencia de compensaciones entre estos componentes. La falta de relación entre distancia entre hileras a la siembra y peso por tallo indicaría que otros factores determinaron la asociación entre el peso por tallo y la producción.

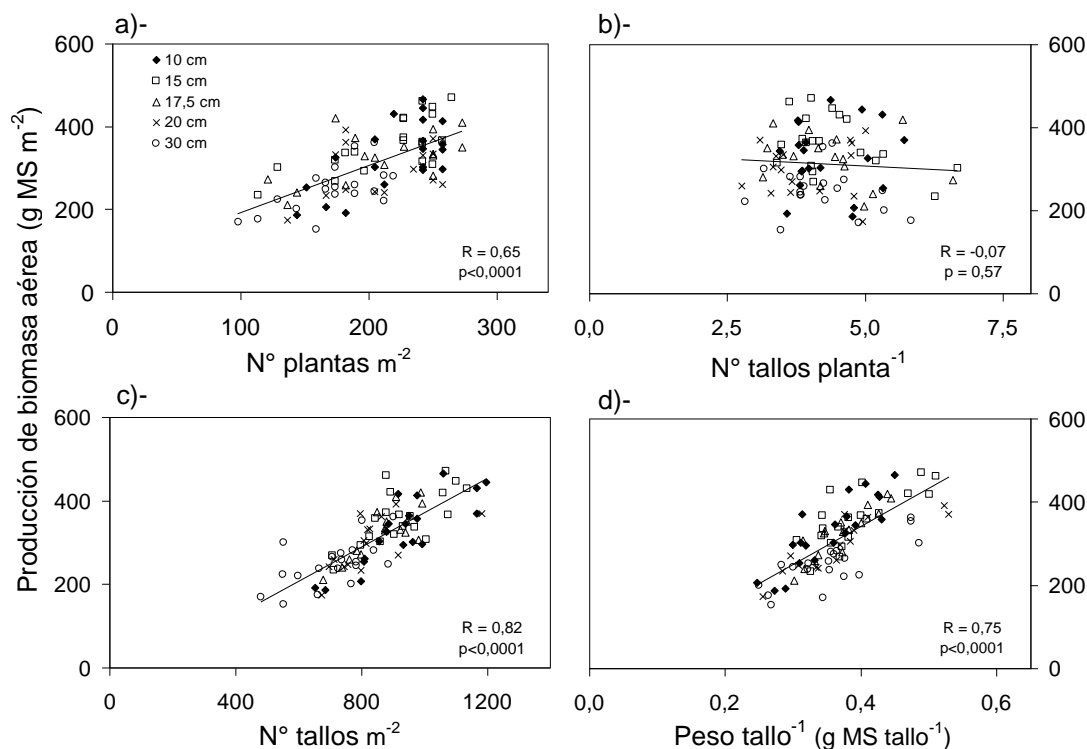


Figura 3.6. Relaciones entre la producción de biomasa aérea y los distintos componentes del rendimiento: a)- Densidad de plantas, b)- Número de tallos por planta, c)- Número de tallos, d)- Peso por tallo, para el cultivar de alfalfa Monarca, durante la primavera-verano del primer año de vida, para cinco distancias entre hileras a la siembra (10 cm, 15 cm, 17,5 cm, 20 cm y 30 cm). Las parcelas fueron raleadas en post-emergencia para uniformar la densidad de plantas  $\text{m}^{-2}$ . Se representan todos los valores de cuatro rebrotes (septiembre, octubre, noviembre y diciembre).

### 3.3.4. Características estructurales de las plantas: Relación hoja:tallo y jerarquías de los tallos por altura

La relación hoja:tallo no se vio afectada por la distancia entre hileras a la siembra ( $p=0,26$ ). Se encontró un efecto significativo del rebrote ( $p<0,0001$ ) y la interacción entre distancia y rebrote no fue significativa ( $p=0,56$ ). El efecto del rebrote estuvo dado por una mayor relación hoja:tallo en octubre (1,60) (Cuadro 3.2), seguida por septiembre (1,48), y disminuyendo en mayor magnitud en los rebrotes de diciembre y enero (0,74).

Cuadro 3.2. Valores medios y coeficiente de variación de la relación hoja:tallo para el cultivar de alfalfa Monarca, durante la primavera-verano del primer año de vida, para cinco distancias entre hileras a la siembra (10 cm, 15 cm, 17,5 cm, 20 cm y 30 cm). Análisis de la varianza para el efecto de la distancia entre hileras a la siembra y el rebrote sobre la relación hoja:tallo.

Distancia (cm)	Septiembre	Octubre	Diciembre	Enero
10	1,42	1,50	0,74	0,79
15	1,44	1,53	0,69	0,71
17,5	1,47	1,56	0,75	0,78
20	1,64	1,70	0,80	0,74
30	1,52	1,75	0,76	0,71
<i>Media</i>	<i>1,49<sup>b*</sup></i>	<i>1,61<sup>a</sup></i>	<i>0,75<sup>c</sup></i>	<i>0,74<sup>c</sup></i>
<i>CV (%)</i>	<i>12,86</i>	<i>12,90</i>	<i>10,24</i>	<i>10,81</i>
ANOVA		LN Relación hoja:tallo		
		----- Valores P -----		
Bloque		0,85		
Distancia		0,26		
Rebrote		<0,0001		
Interacción		0,56		

\* Letras distintas indican diferencias significativas al 5% (DMS).

La distribución de la biomasa en función de la categoría de tallos (dominantes, intermedios o suprimidos) no fue afectada por la distancia entre hileras a la siembra ( $0,38 < p < 0,98$ ). En general, se observó que la mayor proporción de la biomasa se acumuló en tallos dominantes (67% promedio de cuatro rebrotes) (Cuadro I, Apéndice), seguido por los tallos intermedios (26%), mientras que los suprimidos representaron una pequeña proporción (7%).

### 3.3.5. Aprovechamiento de la radiación

La  $fRFA_i$  interceptada por el canopeo fue afectada por la distancia entre hileras a la siembra desde el inicio de cada rebrote (Figura 3.7). Se observó que la distancia de 10 cm interceptó más radiación, siendo muy similar a 15 cm. A medida que aumentó la distancia, las curvas de intercepción en función del tiempo térmico se ubicaron por debajo de estas dos distancias. En el rebrote de septiembre, si bien todas las distancias llegaron a interceptar más del 95% de la RFA incidente, se modificó el momento en el cual cada distancia alcanzó dicha intercepción, que se adelantó a medida que las hileras se encontraron más cerca. En los rebrotes de noviembre y diciembre se llegaron a alcanzar niveles de intercepción del 95% hacia el final del rebrote sólo para las distancias de 10, 15 y 17,5 cm en noviembre, y para 10 y 15 cm en diciembre. Por el contrario, en los rebrotes de octubre y de enero en ninguna distancia se alcanzó una intercepción del 95%, siendo los valores máximos 91% y 90%, respectivamente, que correspondieron a las parcelas con distancias más cercanas (10 y 15 cm). Se observó un patrón general con dos fases, una primera fase con una pendiente más acentuada de incremento del  $fRFA_i$  en función del tiempo térmico, seguida luego por una fase con una pendiente menor.



Consecuentemente, los aumentos en la  $fRFA_i$  a lo largo de los rebrotes en las distancias más cercanas se tradujeron en diferencias significativas sobre la  $RFA_{ia}$  (Cuadro 3.3). Se observó que al incrementar la distancia entre hileras a la siembra se redujo progresivamente la  $RFA_{ia}$  (Figura 3.8), lo cual se constató a partir del contraste de tendencia lineal altamente significativo ( $p<0,0001$ ). También se observó una tendencia cuadrática ( $p=0,04$ ) que estuvo dada por una menor tasa de cambio de la  $RFA_{ia}$  en distancias mayores a 20 cm en todos los rebrotes exceptuando septiembre (Figura 3.8). Al realizar regresiones entre la  $RFA_{ia}$  y la distancia en cada rebrote, las mismas fueron significativas ( $p<0,01$ ) en los cinco rebrotes evaluados ( $0,37<R^2<0,66$ ) con una pendiente negativa entre 1,18 y 1,70 MJ de reducción en la  $RFA_{ia}$  por cada cm de incremento en la distancia por encima de 10 cm. El ajuste de regresiones polinomiales cuadráticas aumentó levemente el coeficiente de determinación ( $0,45<R^2<0,68$ ) con respecto al ajuste lineal simple.

Cuadro 3.3. Análisis de la varianza y contrastes de tendencias para el efecto de la distancia entre hileras a la siembra y el rebrote sobre la RFA interceptada y acumulada ( $RFA_{ia}$ ) y la eficiencia de uso de la radiación (EUR) para el cultivar de alfalfa Monarca, durante la primavera-verano del primer año de vida.

	RFA <sub>ia</sub> (MJ)	EUR (g MS MJ <sup>-1</sup> )
	----- Valores P -----	
ANOVA		
Bloque	<0,01	0,09
Distancia	<0,0001	<0,01
Rebrote	<0,0001	<0,0001
Interacción	0,94	0,71
Contrastes distancias		
Lineal	<0,0001	<0,01
Cuadrático	0,04	<0,01

La EUR también se vio afectada significativamente por la distancia entre hileras a la siembra. En general, se observó un patrón de tipo óptimo donde los valores más altos de EUR se hallaron en 15 y 17,5 cm, disminuyendo hacia distancias menores y mayores (Figura 3.8). Para esta variable los contrastes determinaron tendencias lineales significativas asociadas a disminuciones lineales al cambiar la distancia entre hileras a la siembra por fuera del rango óptimo, mientras que las tendencias cuadráticas estuvieron asociadas a la existencia de un rango óptimo en distancias intermedias. En este caso, se hallaron regresiones polinomiales cuadráticas significativas ( $p<0,05$ ) para tres de los rebrotes evaluados: octubre, noviembre y enero ( $0,33<R^2<0,38$ ).

El rebrote afectó ambas variables (Cuadro 3.3, Figura 3.8). La  $RFA_{ia}$  fue mayor en septiembre (273 MJ), los rebrotes siguientes acumularon menos radiación, siendo mayor en noviembre (194 MJ), intermedio en octubre y diciembre (164 y 162 MJ), y menor en enero (149 MJ). En cuanto a la variación entre rebrotes de la EUR, el rebrote de septiembre se caracterizó por una menor EUR (1,40 g MS MJ<sup>-1</sup>), que luego fue aumentando en octubre (1,89 g MS MJ<sup>-1</sup>) hasta el rebrote de noviembre (2,24 g MS MJ<sup>-1</sup>), y luego decreció nuevamente en diciembre (1,97 g MS MJ<sup>-1</sup>) y más aún en enero (1,57 g MS MJ<sup>-1</sup>).

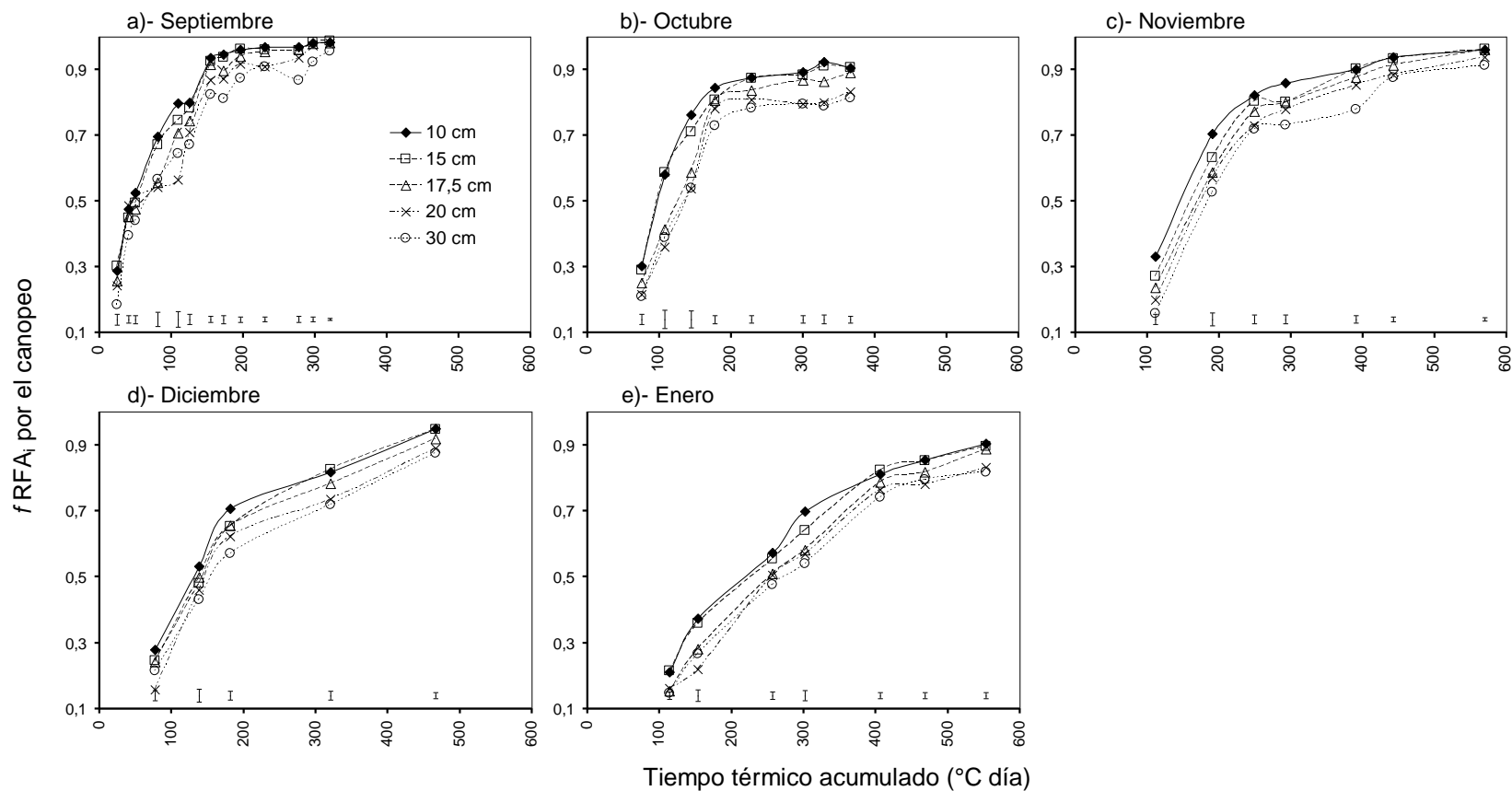


Figura 3.7. Fracción de la RFA interceptada ( $fRFA_i$ ) por el canopeo del cultivar de alfalfa Monarca, durante la primavera-verano del primer año de vida, para cinco distancias entre hileras a la siembra (10 cm, 15 cm, 17,5 cm, 20 cm y 30 cm) en función del tiempo térmico acumulado ( $t^\circ$  base = 5°C) para cinco rebrotes: a)- septiembre, b)- octubre, c)- noviembre, d)- diciembre, e)- enero. Las barras verticales representan el ES por fecha de medición.

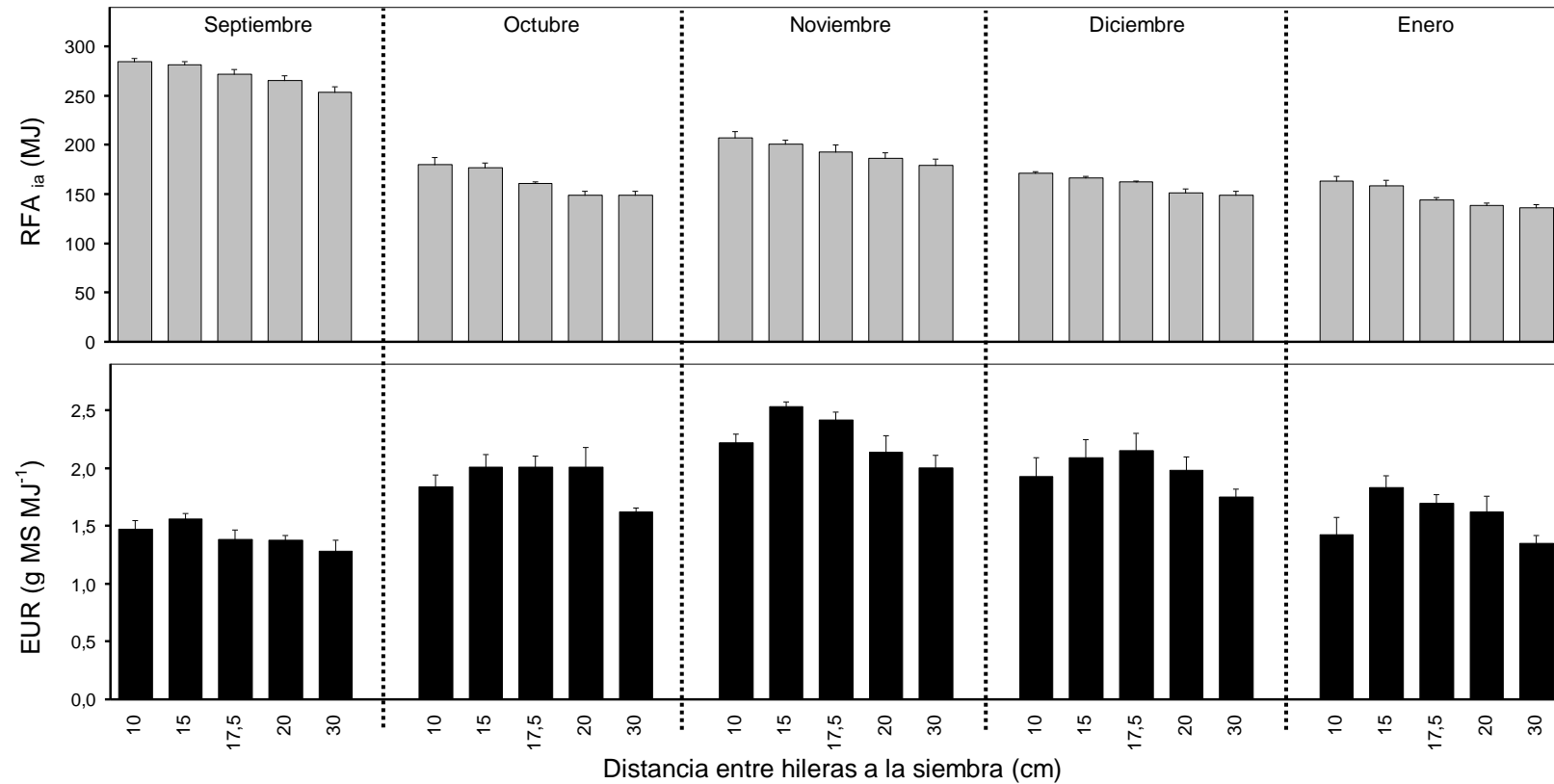


Figura 3.8. RFA interceptada y acumulada (RFA<sub>ia</sub>; panel superior) y eficiencia de uso de la radiación (EUR; panel inferior) para el cultivar de alfalfa Monarca, durante la primavera-verano del primer año de vida, para cinco distancias entre hileras a la siembra (10 cm, 15 cm, 17,5 cm, 20 cm y 30 cm) para cinco rebrotes: a)- septiembre, b)- octubre, c)- noviembre, d)- diciembre, e)- enero. Los valores son medias  $\pm$  ES de cinco repeticiones.

Teniendo en cuenta que no hubo interacción entre distancia entre hileras a la siembra y rebrote se realizó un análisis global del aprovechamiento de la radiación durante el periodo experimental, desde septiembre a enero, considerando la sumatoria de la  $RFA_{ia}$  y de la biomasa de los cinco rebrotes. En la figura 3.9.a se observó como al acercar la distancia entre hileras a la siembra se incrementó linealmente ( $p < 0,0001$ ) la cantidad de RFA capturada por el cultivo de alfalfa, con un incremento de 8 MJ por cada cm que se acercaron las hileras de siembra. Mientras que para la EUR global de todo el período se observó un patrón de tipo óptimo, que ya había sido observado para la EUR por rebrote con la mayores eficiencias en las distancias intermedias, por lo que se ajustó una regresión polinomial cuadrática (Figura 3.9.b). Coincidentemente, la EUR estimada como la pendiente de la regresión lineal entre la sumatoria de la biomasa y la sumatoria de la  $RFA_{ia}$  (Figura 3.10) mostró diferencias significativas entre las distancias entre hileras a la siembra ( $p = 0,002$ ), alcanzando el valor más elevado en la distancia de 15 cm ( $2,17 \text{ g MS MJ}^{-1}$ ), que fue significativamente mayor que en la distancias de 30 cm ( $p = 0,0002$ ) y 10 cm ( $p = 0,015$ ). En cambio, no difirió de las distancias de 17,5 cm y 20 cm ( $p > 0,05$ ).

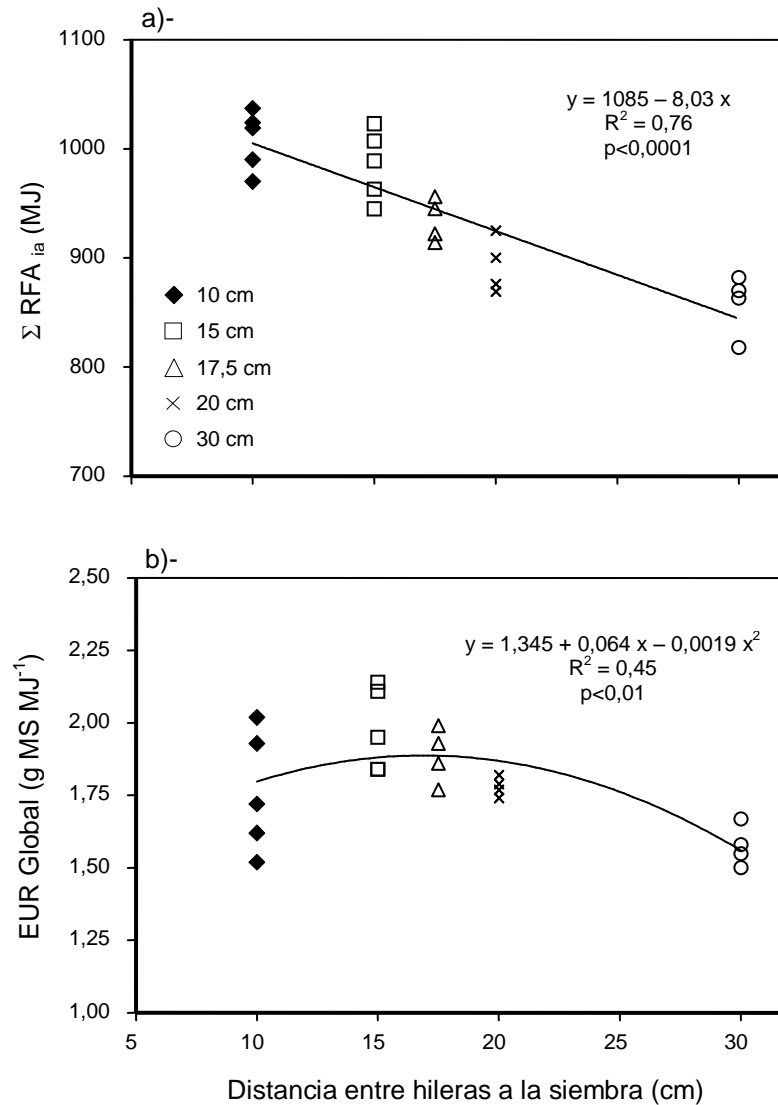


Figura 3.9. a)- Sumatoria de RFA interceptada y acumulada ( $RFA_{ia}$ ) durante el período experimental (septiembre a enero), y b)- Eficiencia de uso de la radiación (EUR) global en función de la distancia entre hileras a la siembra para el cultivar de alfalfa Monarca, durante la primavera-verano del primer año de vida. Se calculó EUR global como el cociente de la  $\Sigma$  Producción de biomasa y la  $\Sigma RFA_{ia}$  durante el período experimental. Se representan los valores de cinco repeticiones.

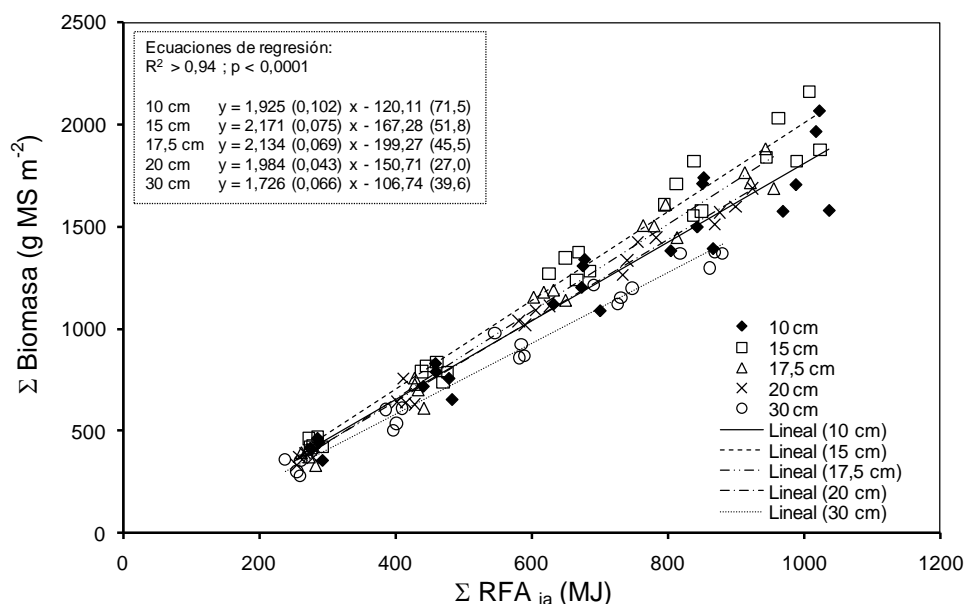


Figura 3.10. Sumatoria de biomasa acumulada en función de la sumatoria de RFA interceptada y acumulada ( $RFA_{ia}$ ) durante el período experimental (septiembre a enero). Las pendientes de las rectas de regresión representan la eficiencia de uso de la radiación (EUR) para cinco distancias entre hileras a la siembra para el cultivar de alfalfa Monarca, durante la primavera-verano del primer año de vida. Se representan los valores de cinco repeticiones.

### 3.3.6. Índice de área foliar y coeficiente de extinción de luz

La distancia entre hileras a la siembra afectó el IAF en los dos rebrotes evaluados (Cuadro 3.4) lo cual tiene relación con la intercepción de radiación ya que el IAF es uno de los atributos del canopeo que directamente determinan esta variable. En el rebrote de diciembre se encontró que la distancia de 30 cm presentó un menor IAF que el resto de las distancias. En enero, en cambio se encontró que las distancias de 30 cm, 20 cm y 10 cm tuvieron un menor IAF que la distancia de 15 cm. De acuerdo a estos resultados se observa las diferencias significativas en el IAF entre distancias ocurrieron entre las distancias más contrastantes en producción de biomasa (Figura 3.4). Para el valor  $k$  no se hallaron diferencias entre distancias entre hileras a la siembra, presentando en ambos rebrotes altos niveles de variabilidad (15 y 23% de coeficiente de variación, para diciembre y enero respectivamente).

Cuadro 3.4. Valores medios del índice de área foliar (IAF) y del coeficiente de extinción de luz ( $k$ ) del canopeo del cultivar de alfalfa Monarca, en dos rebrotes (diciembre y enero) del primer año de vida, para cinco distancias entre hileras a la siembra (10 cm, 15 cm, 17,5 cm, 20 cm y 30 cm). Análisis de la varianza para el efecto de la distancia entre hileras a la siembra y el rebrote sobre IAF y el  $k$ .

Distancia (cm)	IAF diciembre	IAF enero	$k$ diciembre	$k$ enero
10	4,10 <sup>a*</sup>	2,25 <sup>b</sup>	0,74	1,07
15	3,64 <sup>a</sup>	3,03 <sup>a</sup>	0,86	0,81
17,5	3,87 <sup>a</sup>	2,31 <sup>ab</sup>	0,69	1,01
20	3,69 <sup>a</sup>	2,09 <sup>b</sup>	0,64	0,92
30	2,87 <sup>b</sup>	1,86 <sup>b</sup>	0,74	0,95
ANOVA	----- Valores P -----			
Bloque	0,02	0,31	0,05	0,23
Distancia	<0,01	<0,05	0,15	0,47

\* Letras distintas indican diferencias significativas al 5% (DMS).

### 3.3.7. Contenido de clorofila en hojas de distintos estratos

Los valores de clorofila en cada estrato son indicadores de la distribución del nitrógeno en el canopeo y tiene relación con las características del canopeo. En el rebrote de diciembre se observó una tendencia ( $p=0,08$ ) (Cuadro 3.5) a un menor valor de clorofila (SPAD) en el estrato inferior en la distancia de 10 cm comparado con las distancias de 20 y 30 cm. En el rebrote siguiente se hallaron diferencias significativas en el valor de clorofila en el estrato inferior ( $p<0,05$ ), con menos clorofila en las distancias de 10 y 15 cm que en la distancia de 30 cm. Estos resultados tienen relación con la mayor  $fRFA_i$  observada en distancias cercanas, que pudo haber determinado una menor llegada de radiación al estrato inferior conduciendo a los cambios observados en la clorofila.

Cuadro 3.5. Valores medios de clorofila (SPAD) en tres estratos (inferior, medio y superior) del canopeo del cultivar de alfalfa Monarca, en dos rebrotes (diciembre y enero) del primer año de vida, para cinco distancias entre hileras a la siembra (10 cm, 15 cm, 17,5 cm, 20 cm y 30 cm). Análisis de la varianza para el efecto de la distancia entre hileras a la siembra y el rebrote sobre el contenido de clorofila.

Estrato	SPAD diciembre			SPAD enero		
	Inferior (0-20cm)	Medio (20-40cm)	Superior (40-60cm)	Inferior (0-15cm)	Medio (15-30cm)	Superior (30-45cm)
Distancia (cm)						
10	29,6 <sup>b*</sup>	37,7	44,9	34,9 <sup>b</sup>	42,2	51,0
15	32,6 <sup>ab</sup>	38,9	45,3	35,5 <sup>b</sup>	43,4	51,0
17,5	33,0 <sup>ab</sup>	39,0	45,1	36,6 <sup>ab</sup>	44,1	51,2
20	33,2 <sup>a</sup>	37,7	43,3	37,7 <sup>ab</sup>	43,9	49,4
30	34,0 <sup>a</sup>	38,6	44,0	40,0 <sup>a</sup>	45,2	50,1
ANOVA	----- Valores P -----					
Bloque	0,53	0,18	0,68	0,54	0,69	0,32
Distancia	0,08	0,83	0,44	<0,05	0,47	0,63

\* Letras distintas indican diferencias significativas al 5% (DMS).

### 3.3.8. Peso por corona, área por corona y diámetro superior de la raíz pivotante

Las características estructurales de las coronas de las plantas brindan información acerca del vigor de las plantas, y tiene relación con las condiciones en las cuales ocurrió su crecimiento. De acuerdo con el análisis de la varianza las características estructurales de las coronas de las plantas de alfalfa no presentaron diferencias significativas para ninguno de los tres atributos considerados (Cuadro 3.6). No obstante, se observó que las distancias de 15 cm y 17,5 cm presentaron un valor del cuartil superior mayor que el resto de las distancias, especialmente para los atributos peso por corona y área por corona, indicando que en estas distancias la distribución de tamaños de coronas fue distinta, donde el cuartil superior de la población tuvo un peso y área por corona mayor que en las otras distancias. En las distancias de 15 cm y 17,5 cm se observaron los valores mayores de EUR (Figura 3.9) y en la distancia de 15 cm los valores absolutos más altos de producción total de biomasa aérea, lo cual puede tener relación con la distribución de plantas diferente, y la presencia de plantas más vigorosas en dichas distancias.

Cuadro 3.6. Valores medios  $\pm$  ES y cuartiles inferiores ( $Q_1$ ) y superiores ( $Q_3$ ) para el peso y el área de las coronas, y para el diámetro de la raíz pivotante al finalizar el período experimental del cultivar de alfalfa Monarca para cinco distancias entre hileras a la siembra (10 cm, 15 cm, 17,5 cm, 20 cm y 30 cm). Análisis de la varianza para el efecto de la distancia entre hileras a la siembra y el rebrote sobre el peso y el área de las coronas, y para el diámetro de la raíz pivotante.

	Peso corona (g corona <sup>-1</sup> )		Área corona (cm <sup>2</sup> )		Diámetro raíz pivotante (cm)	
Distancia (cm)	Media ± ES	Q <sub>1</sub> - Q <sub>3</sub>	Media ± ES	Q <sub>1</sub> - Q <sub>3</sub>	Media ± ES	Q <sub>1</sub> - Q <sub>3</sub>
10 (n = 46)	0,39±0,05	(0,13-0,52)	1,24±0,20	(0,38-1,69)	0,34±0,02	(0,25-0,45)
15 (n = 46)	0,66±0,10	(0,15-0,96)	2,35±0,48	(0,46-1,81)	0,38±0,02	(0,26-0,51)
17,5 (n = 45)	0,54±0,10	(0,15-0,81)	1,62±0,41	(0,28-1,77)	0,37±0,02	(0,26-0,50)
20 (n = 50)	0,55±0,11	(0,17-0,58)	1,79±0,51	(0,32-1,47)	0,38±0,02	(0,27-0,46)
30 (n = 32)	0,43±0,06	(0,16-0,62)	1,00±0,16	(0,29-1,18)	0,34±0,02	(0,24-0,41)
ANOVA	LN Peso corona		LN Área corona		Diámetro raíz	
	----- Valores P -----					
Bloque	0,21		0,28		0,23	
Distancia	0,52		0,53		0,44	



### 3.4. DISCUSIÓN

En este experimento se logró que el índice de rectangularidad fuera diferente en todo el rango de distancias evaluadas, con una disminución progresiva al acercar la distancia (Figura 3.2). De esta forma al acercar las hileras de siembra la distribución de las plantas fue más uniforme *i.e.* menor distancia entre hileras y mayor distancia entre plantas dentro de cada hilera (Figura 3.1). El establecimiento de canopeos con diferentes índices de rectangularidad generados a partir de cambios en la distancia entre hileras a la siembra es la base que permitió poner a prueba las hipótesis planteadas.

La producción de biomasa en este experimento fue elevada (Figura 3.3), lo cual era esperable por las condiciones cercanas a las óptimas, el ambiente de Rafaela se ubica dentro de los más favorables en el país para la producción de este cultivo (Spada 2008), sumado a condiciones favorables durante este ensayo en cuanto a disponibilidad de agua y control de adversidades. Los resultados hallados demuestran la existencia de una relación lineal significativa de aumento de la producción de biomasa aérea del cultivo de alfalfa al acercar la distancia entre hileras a la siembra hasta un punto óptimo, alrededor de los 15 cm, y que por debajo del cual la producción de biomasa decrece. Para representar este patrón se ajustó una regresión bi-lineal que explicó el 63 % de la variación existente (Figura 3.4). El aumento de la producción en arreglos espaciales más cuadrados hasta la distancia de 15 cm coincide con lo planteado en la hipótesis “a” de este trabajo. El resultado del aumento de la producción al acercar la distancia de siembra y lograr arreglos más cuadrados coincide con lo hallado previamente en Rafaela (Capítulo 2, Mattera *et al.* 2009) y en Australia (Roufail 1975) donde en ensayos de largo plazo se encuentran aumentos de la producción de entre el 5 al 20% al acercar las hileras. En este experimento, el mayor aumento relativo de la producción de biomasa, entre el 16 al 42% (Cuadro 3.7) probablemente se haya debido a analizar los rebrotes de primavera y verano, que es donde se concentra el efecto de la distancia (Capítulo 2, Mattera *et al.* 2009), y donde la partición hacia corona y raíces sería menor, particularmente en primavera, potenciando los efectos sobre la producción de biomasa aérea (Khaiti y Lemaire 1992, Brown *et al.* 2006). Por otra parte, en la distancia de 10 cm si bien el arreglo espacial fue más cuadrado que en 15 cm la producción de biomasa disminuyó, no cumpliendo en este caso la hipótesis planteada, y coincidiendo con la respuesta de tipo óptimo previamente observada en Rafaela (Capítulo 2, Mattera *et al.* 2009). Con respecto a la calidad del forraje cosechado no se esperarían cambios asociados a la composición morfológica de las pasturas debido a que la relación hoja:tallo no fue afectada por la distancia entre hileras a la siembra (Cuadro 3.2).

Cuadro 3.7. Efecto de la distancia entre hileras a la siembra sobre la radiación fotosintéticamente activa interceptada acumulada ( $RFA_{ia}$ ) y la producción de biomasa expresado como desviación porcentual de la distancia de 30 cm para el cultivar de alfalfa Monarca. Calculado sobre el valor promedio de cinco rebrotes donde se evaluó la intercepción de radiación (septiembre, octubre, noviembre, diciembre y enero).

	Distancia (cm)			
	10	15	17,5	20
Dif. % $RFA_{ia}$	+ 16	+ 13	+ 9	+ 4
Dif. % Producción de biomasa	+ 29	+ 42	+ 28	+ 16
Dif. $RFA_{ia}$ / Dif. Producción de biomasa	0,54	0,32	0,30	0,24

A pesar del control inicial de la densidad de plantas se observó un efecto de la distancia entre hileras a la siembra posterior al raleo, con una mayor densidad de plantas a medida que fue disminuyendo la distancia entre hileras a la siembra (Figura 3.5.a). Esta mayor densidad de plantas establecidas coincide con lo hallado previamente en Rafaela (Capítulo 2, Mattera *et al.* 2009) y en Australia (Roufail 1975), y también en pasturas de agropiro en Balcarce (Bertram 2008). Las diferencias en la densidad de plantas por efecto del rebrote (Cuadro 3.1, Figura 3.5.a) indican que en todas las distancias ocurrió mortalidad denso-dependiente. Sin embargo, la relación significativa entre distancia entre hileras a la siembra y densidad de plantas evidencia que en distancias más espaciadas la competencia intra-específica fue más intensa, con una mayor mortalidad denso-dependiente desde etapas tempranas en el ciclo de la pastura. En diversas especies de pasturas la tasa de mortalidad se relaciona con la distancia al vecino más cercano (Skinner 2005) lo cual coincide con lo hallado en este experimento ya que en las distancias entre hileras más espaciadas las plantas estuvieron más juntas en la hilera y aumentó la mortalidad de plantas. Cabe destacar que la densidad de plantas se redujo más fuertemente por la época de año que por la distancia entre hileras a la siembra, con una pérdida de plantas muy importante durante el verano, particularmente entre los meses de diciembre y enero, coincidiendo con la mayor mortalidad de plantas durante el verano asociada a las altas tasas de crecimiento del cultivo (Gosse *et al.* 1988).

Los componentes que variaron entre distancias entre hileras a la siembra fueron la densidad de plantas y el número de tallos por  $m^{-2}$ , aumentando ambos con menores distancias (Figura 3.5) y con una correlación significativa entre ambos componentes ( $R=0,61$ ;  $p<0,0001$ ). La distancia entre hileras a la siembra afectó en mayor medida al número de tallos  $m^{-2}$  (mayores  $R^2$ ). Ambos componentes se correlacionaron positivamente con la producción de biomasa, aunque en mayor magnitud el número de tallos (Figura 3.6.a y 3.6.c). Esto quiere decir que el mayor número de tallos por superficie determinado por una mayor densidad de plantas al acercar la distancia entre hileras a la siembra, fue responsable del incremento observado en la producción de biomasa. Sin embargo, el análisis de los componentes del rendimiento no permitió dilucidar el componente determinante de la caída de la producción en la distancia de 10 cm. La importancia de los distintos componentes del rendimiento en la explicación del efecto sobre la producción de biomasa varía de acuerdo con la práctica de manejo considerada. Existen experimentos en alfalfa donde la dinámica del número de plantas (Teixeira *et al.* 2007a) y de tallos por superficie se asoció al ambiente lumínico y la competencia por luz (Varela 2002). Los resultados hallados en este experimento coinciden con los antecedentes de cambio en los componentes de número de plantas y número de tallos por superficie asociados al ambiente lumínico. Aunque en nuestro experimento el efecto principal fue la disminución en la densidad de plantas en los arreglos más rectangulares, y al no cambiar el número de tallos por planta, se produce por lo tanto la disminución en el número de tallos por unidad de superficie. De todas formas, no se puede descartar que también hayan intervenido procesos de competencia por agua y/o nutrientes. Existen antecedentes donde el peso por tallo es el componente del rendimiento que explica las diferencias causadas por prácticas como la fertilización (Berg *et al.* 2005) o la frecuencia de pastoreo (Teixeira *et al.* 2007a). No fue este el caso de la distancia entre hileras a la siembra, ya que en este experimento, ni el número de tallos por planta, ni el peso por tallo se vieron afectados por la distancia entre hileras a la siembra. En este resultado podría haber intervenido una baja sensibilidad de la alfalfa a cambios en la calidad de la radiación (relación rojo/rojo lejano), o que por el contrario la calidad de la radiación no se haya afectado por la distancia entre hileras a la siembra,

en ambos casos no se hallaron antecedentes en alfalfa. Por otra parte, el resultado hallado significa que en distancias más cercanas el mayor número de tallos y plantas por unidad de superficie no implicó compensaciones (reducciones) por el lado del peso por tallo o la cantidad de tallos por planta. Los resultados en el número de tallos fueron consistentes con la hipótesis “b” de un mayor número a menor distancia por una menor competencia intra-específica, mientras que no fue así para el peso por tallo. A pesar de esto, el peso por tallo se correlacionó positivamente con la producción de forraje (Figura 3.6.d) lo cual podría estar relacionado con parte de la variación de la producción que no fue explicada por la distancia entre hileras a la siembra, y que pudo deberse a la estacionalidad de la producción, a características edáficas diferentes de las parcelas y/o la variabilidad genética de la variedad utilizada. En relación con la estacionalidad de la producción y la variación en el peso por tallo, el proceso de almacenamiento y la removilización de asimilados hacia o desde la corona y raíces tiene un rol importante determinando la partición de biomasa hacia cada tallo individual. De esta forma, considerando que la partición a raíces y corona aumenta hacia el final del verano (Brown *et al.* 2006), es factible que el peso por tallo en enero se haya visto reducido por una mayor partición de biomasa hacia órganos subterráneos dando lugar a una menor producción de biomasa aérea.

Durante el progreso del rebrote en el cultivo de alfalfa existe mortandad de tallos por la competencia por luz siendo más perjudicados los tallos provenientes de yemas de tallos basales que aquellos de yemas de la corona (Gosse *et al.* 1988). Por medio de otra categorización de los tallos en función de su altura se observó una mayor mortandad durante el rebrote de los tallos suprimidos e intermedios que de los dominantes (Teixeira *et al.* 2007a). Al aumentar la competencia por luz se esperaban cambios en la distribución de biomasa entre jerarquías de tallos, *i.e.* mayor proporción de la biomasa en tallos dominantes en distancias entre hileras a la siembra más espaciadas como consecuencia de una mayor mortandad de tallos suprimidos e intermedios. Aunque no sucedió esto en este ensayo ya que no se encontraron diferencias entre distancias (Cuadro I, Apéndice) y en todos los casos los tallos dominantes representaron la mayor proporción de la biomasa acumulada. En este experimento los únicos atributos que fueron medidos por individuo fueron las características de las coronas al finalizar el ensayo y se encontró una distribución en las distancias de 15 cm y 17,5 cm donde el cuartil superior de la población presentó mayor peso y área de corona que en el resto de las distancias, lo cual podría resultar un efecto de la competencia intra-específica que según Park *et al.* (2003) puede ocasionar la alteración de la jerarquía de tamaños de los individuos de la población.

De acuerdo a los resultados obtenidos en este experimento se pudo comprobar la hipótesis “c” de un incremento en la  $RFA_{ia}$  por el acercamiento de las hileras de siembra (Cuadro 3.3, Figura 3.8 y Figura 3.9.a). El efecto sobre la intercepción no sólo se explicó por alcanzar antes el IAF crítico, sino también por la mayor intercepción de radiación al acercar la distancia entre hileras por debajo de este umbral (Figura 3.7). Este efecto de la distancia entre hileras a la siembra había sido registrado en diversos cultivos agrícolas, pero no se contaban con antecedentes en alfalfa, donde las características del cultivo y del uso que se realiza del mismo, son muy distintas a las condiciones en que se manejan los cultivos para granos. En este experimento, se modificó significativamente el IAF al momento del corte, pero las diferencias en este atributo se observan más bien entre las distancias más contrastantes en términos productivos (Cuadro 3.4) y no llegan a explicar plenamente los patrones de  $RFA_{ia}$ . En varios cultivos el acercamiento de las hileras aumentó la intercepción por cambios en la arquitectura del canopeo, *i.e.* mayor coeficiente de extinción de luz ( $k$ ), en maíz (Flenet

*et al.* 1996; Barbieri *et al.* 2000), soja (Flenet *et al.* 1996), y girasol (Zaffaroni y Schneiter 1989; Flenet *et al.* 1996). Al analizar el coeficiente  $k$  en este experimento no se hallaron diferencias significativas entre las distancias, sin embargo es preciso destacar que el  $k$  se estimó a partir de los datos obtenidos en el momento previo al corte, por lo que se desconoce cómo fue la evolución del  $k$  durante el rebrote. De esta forma los menores valores de clorofila en el estrato inferior al reducir la distancia entre hileras a la siembra podrían ser entonces un indicio de un mayor  $k$  durante el rebrote, teniendo en cuenta que en alfalfa el perfil de distribución del nitrógeno se relaciona con el perfil de distribución de la luz (Lemaire *et al.* 1991)

Al analizar los cambios en la  $RFA_{ia}$  y los cambios en la producción de biomasa (Cuadro 3.7) se observa que los cambios en la producción fueron relativamente más importantes que los cambios en la interceptación, lo cual se explica por las diferencias que se observaron en la EUR. Estas diferencias en EUR fueron inesperadas y no concuerdan con la hipótesis “d” planteada en este trabajo. El patrón observado para la EUR fue más bien de tipo óptimo (15 cm) (Figura 3.8, Figura 3.9.b y Figura 3.10) y se proponen dos explicaciones para el mismo. Por un lado la EUR disminuye en la distancia de 10 cm, donde se registraron menores valores de clorofila en el estrato inferior (Cuadro 3.6), lo cual se relaciona con el cierre más temprano del canopy, y la relación estrecha que existe entre la radiación que llega a las hojas y su contenido de nitrógeno (Lemaire *et al.* 1991). En este caso, los menores valores de clorofila podrían ser indicativo de menores niveles de fotosíntesis en este estrato, así como también de mayor senescencia de hojas, que en ambos casos repercute negativamente sobre la EUR. Por otra parte, la menor EUR estuvo relacionada con un menor IAF alcanzado al momento de corte de la pastura (Figura 3.11) y explicaría las menores EUR en las distancias más espaciadas, especialmente en la distancia de 30 cm donde se registraron los menores valores de IAF. Esta relación entre IAF y EUR ha sido reportada previamente en otros cultivos (Sinclair y Horie 1989; Hall *et al.* 1996; Ruíz *et al.* 2008) como consecuencia de que en valores bajos de IAF mayor proporción de las hojas se encuentran en saturación lumínica donde la eficiencia cuántica es menor. El efecto del aumento del IAF sobre la EUR se observa más bien en valores bajos de IAF (Sinclair y Horie 1989), que sería el caso de este experimento donde el cultivo de alfalfa tuvo períodos de crecimiento relativamente cortos, por lo que la mayor parte de los rebrotes transcurrieron con IAF bajos.

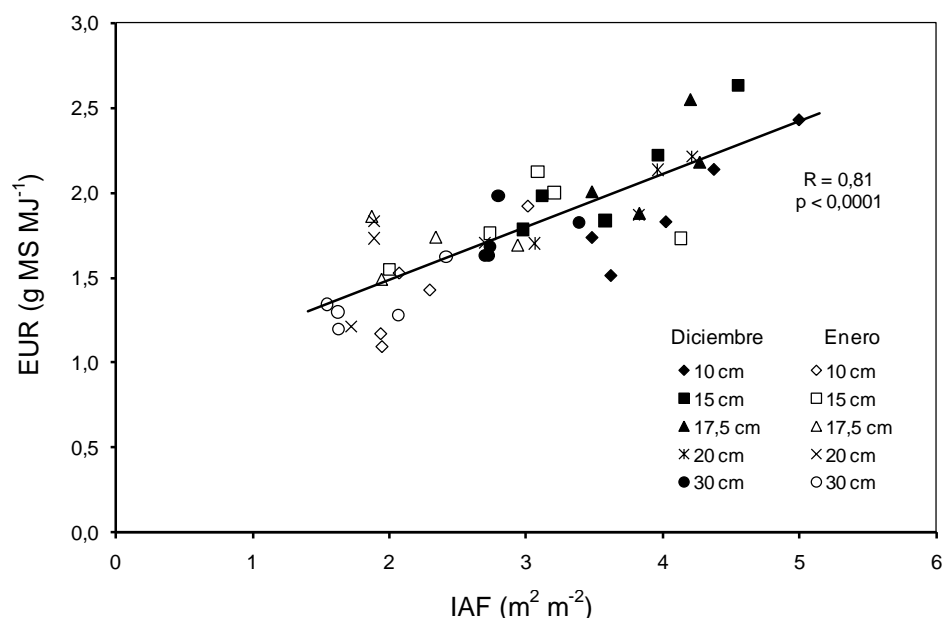


Figura 3.11. Relación entre el índice de área foliar (IAF) y la eficiencia de uso de la radiación (EUR) para el cultivar de alfalfa Monarca, para dos rebrotes (diciembre y enero) en el primer año de vida, para cinco distancias entre hileras a la siembra (10 cm, 15 cm, 17,5 cm, 20 cm y 30 cm). Se representan los valores de cinco repeticiones.

La EUR del cultivo de alfalfa también fue afectada por el rebrote, es decir por la estacionalidad, siendo consistente con antecedentes que demuestran la existencia de una relación de la EUR con la temperatura, con incrementos lineales de la EUR al aumentar la temperatura hasta un valor umbral (21,3° C) por encima del cual se estabiliza (Collino *et al.* 2005). En este experimento el patrón fue similar, sin embargo, en los rebrotes de diciembre y enero, con temperaturas mayores al umbral (25° C) disminuyó la EUR, lo que podría ser indicio de una mayor partición hacia órganos subterráneos.

El acercamiento de las hileras modificó radicalmente el arreglo espacial de las plantas del cultivo de alfalfa afectando significativamente tanto los componentes del rendimiento, densidad de plantas y el número de tallos por superficie, como también los componentes del modelo ecofisiológico, actuando tanto al nivel de la intercepción, como de la eficiencia de uso de la radiación. Estos arreglos espaciales más equidistantes entre las plantas en las distancias más cercanas promovieron condiciones de menor competencia intra-específica permitiendo una mayor supervivencia de plantas sin que las mismas redujeran su crecimiento (mismo número de tallos por planta y peso por tallo), lo cual resultó en el mayor número de tallos establecidos por superficie que explicaron en parte los aumentos en la producción de biomasa. Estos resultados sugieren que en distancias cercanas sería más factible alcanzar un mayor número de plantas que permite elevar la producción de biomasa (Volenec *et al.* 1987). Sin embargo, la respuesta del aumento de la densidad en distancias cercanas cuando no estuvo asociada a una mejora en el arreglo espacial no implicó una mayor producción de biomasa, como fue observado en la distancia de 15 cm en el experimento previo en Rafaela (Capítulo 2, Mattera *et al.* 2009). Desde la aproximación ecofisiológica, en el rango de distancias evaluado la respuesta en la intercepción fue lineal, mientras que en la EUR fue de tipo óptimo. Para caracterizar la respuesta en producción de biomasa aérea total se ajustó una relación bi-lineal determinada por el efecto del patrón tipo

óptimo de la EUR. Por otra parte, si bien la alfalfa ha sido caracterizada como una especie eficiente en términos de la captura de la radiación (Travis y Reed 1983; Heichel *et al.* 1988) los resultados aquí obtenidos indican una limitada flexibilidad (plasticidad) para compensar los cambios producidos por el arreglo espacial. En este sentido, sería de interés en el futuro estudiar el efecto de la distancia sobre el coeficiente de extinción de luz y el IAF en distintos momentos del rebrote en materiales con características estructurales diferentes *e.g* variedades multifoliadas. Esta información podría también ser útil para profundizar la comprensión de los cambios en la eficiencia de uso de la radiación asociada a bajos IAF durante el transcurso de los rebrotes.

## Capítulo 4: DISCUSIÓN GENERAL

### 4.1. Efectos de la distancia entre hileras a la siembra sobre la acumulación de biomasa aérea y mecanismos involucrados

Con la finalidad de estudiar la influencia del arreglo espacial modificado a través de cambios en la distancia entre hileras a la siembra sobre el comportamiento productivo de pasturas perennes de alfalfa se realizaron dos ensayos que aportaron información desde facetas diferentes y complementarias.

En un primer experimento se evaluaron las distancias más comúnmente utilizadas en Argentina para la siembra de pasturas (15 cm, 17,5 cm y 21 cm) conforme a las características de los equipos de siembra comúnmente utilizados en el país, sembradas con una misma densidad de semillas por ha (7 Kg.). Este experimento fue de largo plazo evaluando tres ciclos de producción sobre la misma pastura, lo cual resulta un aspecto clave a considerar en pasturas perennes, y particularmente en alfalfa que no tiene capacidad de resiembra. De esta forma, la información obtenida permitió estudiar el efecto sobre la producción de biomasa en toda la vida de la pastura, identificando los períodos donde ocurrieron las diferencias, y permitiendo también evaluar el efecto sobre la persistencia de la pastura. Adicionalmente, este primer ensayo se realizó en dos cultivares de alfalfa ampliamente difundidos en el país: Monarca (sin reposo invernal) y Victoria (reposo invernal intermedio). Las plantas de alfalfa con diferente grado de reposo invernal se caracterizan por poseer características estructurales diferentes *e.g.* un menor tamaño de corona y tallos más erectos en variedades sin reposo invernal (Rossanigo *et al.* 1995) y esto podría modificar la respuesta al distanciamiento. En este experimento se estudió la dinámica de los componentes del rendimiento como la densidad de plantas por superficie y el peso aéreo promedio por planta. Este primer experimento aportó información novedosa acerca del efecto de la distancia entre hileras a la siembra sobre la producción en el largo plazo, y si bien existían antecedentes en alfalfa en otros países (Roufail 1975; Lutz y Morley 1982) no existían en Argentina en cultivos puros de alfalfa.

En un segundo experimento se estudió el efecto del distanciamiento en el cultivar Monarca en un período más acotado de tiempo (primavera y verano del primer año de crecimiento). En este caso se evaluó un rango más amplio de distanciamientos (10 cm, 15 cm, 17,5 cm, 20 cm y 30 cm) generando un gradiente en los arreglos espaciales obtenidos. En este experimento se controló la densidad de plantas por medio de un raleo en post-emergencia del cultivo estableciendo una densidad de 250 plantas  $m^{-2}$ . Se estudió el efecto sobre la producción de biomasa con la aproximación de los componentes del rendimiento de forraje con un nivel de detalle mayor que en el primer ensayo: densidad de plantas por superficie, número de tallos por planta, número de tallos por superficie y peso por tallo. En este experimento se estudió también el efecto sobre la producción de biomasa aérea con la aproximación ecofisiológica de intercepción y uso de la radiación. Se estudiaron también variables secundarias (relación hoja:tallo, jerarquías de tallos, IAF, nivel de clorofila por estrato y características de las coronas) que aportaron a la comprensión de los resultados obtenidos. Este segundo experimento es el primer trabajo en alfalfa donde se estudiaron los efectos de la distancia entre hileras a la siembra sobre la producción de biomasa y los componentes del rendimiento en el marco del modelo de aprovechamiento de la radiación.

Al estudiar el impacto de la distancia entre hileras a la siembra sobre los componentes de rendimiento del cultivo de alfalfa en ambos experimentos se observó que al acercar las hileras de siembra se estableció una mayor densidad de plantas, esto

fue así en el período inicial del primer experimento (Figura 2.3.a) y durante todo el segundo experimento (Figura 3.5.a). La mayor densidad podría deberse a una mayor emergencia o a una menor mortalidad de plántulas. La emergencia no fue estudiada en esta tesis pero los resultados hallados en el segundo experimento, con cambios en la densidad luego del raleo, confirman la existencia de una menor mortalidad en distancias cercanas. Esta mayor supervivencia de plantas es evidencia de un ambiente competitivo menos intenso en distancias cercanas con arreglos espaciales más cuadrados. Por otra parte, la reducción en el peso de los individuos con el aumento de la densidad es también un efecto resultante de la competencia intra-específica (Park *et al.* 2003). En este aspecto, los resultados difirieron entre experimentos. En el primer experimento el mayor número de plantas instalado provocó una reducción en el tamaño por planta disminuyendo la producción total de biomasa en la distancia más cercana (15 cm). En cambio, en el segundo experimento al acercar las hileras aumentó el número de plantas y tallos por superficie pero no se registraron reducciones en el tamaño de los mismos, originando la respuesta positiva observada en la producción de biomasa. Comparativamente, en la primavera posterior a la siembra el segundo experimento tuvo en promedio un 20% menos plantas pero con un peso por planta 456% mayor que en el primer experimento. Es decir, en el segundo experimento la mayor densidad de plantas establecidas en distancias cercanas ocurrió con plantas más vigorosas y esto permitió que el tamaño de las mismas no se viera afectado, contrariamente a lo ocurrido en el primer experimento. Adicionalmente, en el segundo experimento una menor distancia entre hileras a la siembra implicó siempre un arreglo espacial más cuadrado, mientras que en el primer experimento las distancias de 15 cm y 17,5 cm tuvieron el mismo arreglo espacial por los cambios en la densidad de plantas. Estas diferencias en la estructura de las pasturas explican las discrepancias observadas entre experimentos. Estos resultados también confirman la complejidad del proceso de mortalidad de plantas, que es afectado tanto por la densidad como por el ambiente (Rowe 1989). De acuerdo con la hipótesis “b” planteada en esta tesis de un mayor número y peso por tallo a menor distancia por una menor competencia intra-específica, a partir del segundo experimento se concluye que los resultados en el número de tallos fueron consistentes con la hipótesis planteada, mientras que no fue así para el peso por tallo. Es probable que la mejora en el ambiente por reducir la distancia entre hileras a la siembra no llegara a ser de tal magnitud como para producir un aumento en el peso por tallo además de los efectos antes mencionados sobre la supervivencia de plantas.

Por otra parte, al analizar los efectos de la distancia entre hileras a la siembra sobre la captura y eficiencia en el uso de la radiación en el cultivo de alfalfa se observó que el acercamiento de las hileras aumentó la cantidad de radiación interceptada con una relación lineal negativa significativa (Figura 3.9.a) verificando la hipótesis “c” de una mayor  $RAF_{ia}$  durante el rebrote por la menor rectangularidad del arreglo espacial. Esta respuesta si bien había sido encontrada en diversos cultivos no había sido hasta el momento reportada en el cultivo de alfalfa. También se halló un aumento de la EUR al acercar las hileras aunque en este caso la respuesta fue de tipo óptimo (Figura 3.8, Figura 3.9.b y Figura 3.10), esta respuesta no coincide con la hipótesis “d” formulada en esta tesis que planteaba la estabilidad en la EUR frente a cambios en la distancia entre hileras a la siembra. Si bien existen antecedentes de respuestas negativas en la EUR al acercamiento de hileras (Board *et al.* 1994; Maddonni *et al.* 2006; Bertram 2008) no se hallaron de respuestas de tipo óptimo. La respuesta observada podría estar relacionada con un gradiente del índice de rectangularidad más contrastante explorado en este experimento (Figura 3.2) que se ve acentuado por las mayores densidades utilizadas en pasturas con respecto a otros cultivos.



En relación con la producción de biomasa aérea, en el primer experimento se observó que el efecto de la distancia entre hileras a la siembra sobre la producción de biomasa fue significativo y se manifestó en toda la vida de la pastura ya que se hallaron diferencias en los tres años de producción evaluados (Figura 2.2) y con un patrón similar en los dos cultivares. La mayor producción de biomasa en la distancia de 17,5 cm donde el arreglo fue más cuadrado que a 21 cm apoyó la hipótesis “a” de esta tesis de que al disminuir la distancia entre hileras a la siembra se generan arreglos espaciales más cuadrados que aumentan la producción de biomasa del cultivo de alfalfa. Los resultados hallados en el segundo experimento corroboraron esta hipótesis al registrar una relación lineal negativa significativa entre distancia entre hileras a la siembra y producción de biomasa hasta la distancia de 15 cm (Figura 3.4). Sin embargo, la ocurrencia de valores óptimos de producción de biomasa aérea en las distancias de 17,5 cm y 15 cm, en el primer y segundo experimento respectivamente, dan cuenta de que la mejora en el arreglo espacial y el incremento en la  $RFA_{ia}$  al acercar las hileras de siembra no son los únicos mecanismos involucrados en las respuestas observadas, pudiendo ocurrir disminuciones productivas asociadas a procesos denso-dependientes diferentes como se evidenció en el primer experimento donde una mayor densidad de plantas en la distancia de 15 cm propició plantas menos vigorosas, y a procesos vinculados con la EUR en el segundo experimento donde el patrón óptimo encontrado en la EUR provocó la disminución de la producción en la distancia de 10 cm determinando el ajuste de una función bi-lineal entre producción de biomasa y distancia entre las hileras a la siembra.

Por último, los efectos positivos del acercamiento de las hileras no afectaron características de interés en pasturas perennes como la persistencia del cultivo y la relación hoja:tallo, ya que se observó en el experimento de largo plazo una misma densidad de plantas en el tercer año de vida en todas las distancias (Figura 2.3), y una relación hoja:tallo similar en el rango de distancias evaluado en el segundo experimento (Cuadro 3.2).

## 4.2. Conclusiones generales

1. La distancia entre hileras a la siembra permitió modificar el arreglo espacial del cultivo de alfalfa reduciendo el índice de rectangularidad al acercar las hileras de siembra. De esta forma, se alcanzó una distribución de las plantas más equidistante en el espacio.
2. La producción de biomasa aérea del cultivo de alfalfa aumentó por efecto de la disminución de la distancia entre hileras a la siembra cuando se generó un arreglo espacial más equidistante entre las plantas hasta una distancia óptima, entre 15 y 17,5 cm. Estos efectos se observaron en el largo plazo, y se encontraron concentrados en los períodos con mayores tasas de crecimiento del cultivo (primavera-verano).
3. El componente del rendimiento principalmente afectado por la distancia entre hileras a la siembra fue la densidad de plantas. Al acercar las hileras de siembra se observó una mayor supervivencia de plantas que sería indicativo de una menor competencia intra-específica, que explica en parte los aumentos hallados en la producción de biomasa aérea del cultivo de alfalfa.
4. A su vez, los incrementos de la producción de biomasa aérea estuvieron determinados por cambios en ambos componentes del modelo ecofisiológico de aprovechamiento de la radiación. Al acercar la distancia entre hileras a la siembra aumentó linealmente la  $RAF_{ia}$ , explicado por una mayor interceptación de radiación desde etapas tempranas del rebrote, mientras que la EUR presentó un óptimo a 15 cm, que estaría relacionado con valores absolutos de IAF y de la distribución espacial del IAF más favorables para la fotosíntesis del cultivo.
5. La persistencia del cultivo no fue afectada por la distancia entre hileras a la siembra, ya que se estabilizó la densidad de plantas en un mismo valor en todas las distancias durante el tercer ciclo productivo de la pastura.

## 4.3. Implicancias para el manejo del cultivo

Los resultados hallados en esta tesis resaltan la importancia del manejo de la distancia entre hileras a la siembra en el cultivo de alfalfa.

El acercamiento de las hileras hasta los 15 – 17,5 cm con arreglos espaciales más cuadrados permitió aumentar la producción de biomasa aérea, es decir la producción de forraje, lo cual resulta un aspecto clave en la intensificación de las tierras destinadas a la producción ganadera. Resulta necesario destacar que la tendencia observada en el diseño de equipos para siembra de pasturas de una mayor separación entre las hileras de siembra son contrarias al manejo que surge de esta tesis como el más conveniente en el cultivo de alfalfa. En el caso de que se opte por siembras más espaciadas, es decir arreglos espaciales más rectangulares, sería interesante explorar una mayor cantidad de variedades para detectar aquellas que posean un mayor rango de plasticidad, en el sentido definido por Maddonni *et al.* (2001) en el cultivo de maíz, lo cual significa una mayor capacidad para acomodar las hojas en el espacio entre hileras, mejorando así el aprovechamiento de la radiación. Para el caso de la alfalfa, se podrían estudiar variedades con caracteres diferenciales en las hojas como alfalfa multifoliadas, o incluso se podría seleccionar variedades con dicha capacidad desde el mejoramiento genético.

#### **4.4. Perspectivas para futuras investigaciones**

Los resultados obtenidos en esta tesis dan lugar a nuevas preguntas relacionadas con los efectos de la distancia entre hileras a la siembra en los componentes del rendimiento y el aprovechamiento de la radiación en el cultivo de alfalfa:

1. Si bien se establecieron relaciones entre la EUR y el IAF que explicaron en parte las diferencias observadas en la EUR surge la necesidad de estudiar cómo es la dinámica del IAF y del coeficiente de extinción de la luz ( $k$ ) durante el progreso del rebrote de alfalfa en los diferentes distanciamientos, y cómo se relaciona con la EUR.

2. Por otra parte, surge la pregunta de cómo la distancia entre hileras a la siembra afecta la calidad de la luz en el canopeo de alfalfa, y cómo interviene en la dinámica de los componentes del rendimiento de forraje.

3. Por último se plantea la pregunta de cómo el acercamiento entre las hileras de alfalfa incide sobre la dinámica de las malezas, lo cual podría constituir otro beneficio adicional del manejo de esta práctica agronómica.

## BIBLIOGRAFÍA

- Andrade FH, Cirilo AG, Uhart S, Otegui ME (1996) Crecimiento del cultivo de maíz. Editorial La Barrosa, Balcarce, Argentina.
- Andrade FH, Calvino P, Cirilo A, Barbieri P (2002) Yield Responses to Narrow Rows Depend on Increased Radiation Interception. *Agronomy Journal* **94**, 975-980.
- Avise JC, Lemaire G, Ourry A, Boucaud J (1997) Effects of the previous shoot removal frequency on subsequent shoot regrowth in two *Medicago sativa* L. cultivars. *Plant and Soil* **188**, 189-198.
- Barbieri PA, Sainz Rozas HR, Andrade FH, Echeverria HE (2000) Row spacing effects at different levels of nitrogen availability in maize. *Agronomy Journal* **92**, 283-288.
- Basigalup DH, Rossanigo R, Ballario MV (2007) Panorama actual de la alfalfa en la Argentina. En: Basigalup DH (Ed.) El cultivo de la alfalfa en la Argentina. Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina. Pgs. 15-25.
- Berg WK, Cunningham SM, Brouder SM, Joern BC, Johnson KD, Santini J, Volenec JJ (2005) Influence of Phosphorus and Potassium on Alfalfa Yield and Yield Components. *Crop Science* **45**, 297-304.
- Bertram, N (2008) Respuesta de agropiro alargado (*Thinopyrum ponticum*) a la densidad de siembra y al arreglo espacial: desarrollo del área foliar, estructura poblacional e intercepción lumínica en el año de implantación. Tesis M.Sc. Balcarce, Argentina, Escuela para Graduados en Ciencias Agropecuarias.
- Board JE, Kamal M, Harville BG (1992a) Temporal Importance of Greater Light Interception to Increased Yield in Narrow-Row Soybean. *Agronomy Journal* **84**, 575-579.
- Board JE, Harville BG (1992b) Explanations for greater light interception in narrows vs. wide row soybean. *Crop Science* **32**, 198-202.
- Board JE, Harville BG, Kamal M (1994) Radiation-use efficiency in relation to row spacing for late-planted soybean. *Field Crops Research* **36**, 13-19.
- Brown HE, Moot DJ, Teixeira EI (2006) Radiation use efficiency and biomass partitioning of lucerne (*Medicago sativa*) in a temperate climate. *European Journal of Agronomy* **25**, 319-327.
- Bullock DG, Nielsen RL, Nyquist WE (1988) A growth analysis comparison of corn grown in conventional and equidistant plant spacing. *Crop Science* **28**, 254-258.
- Colabelli MR, Urcola H, Agnusdei MG (2002) Intersiembra de leguminosas en suelos de aptitud agrícola. 1. Efecto de la época de intersiembra y de la distancia entre surcos sobre el establecimiento de las especies intersembradas. *Avances en Producción Animal* **27**, 77-86.
- Collino DJ, Dardanelli JL, De Luca MJ, Racca RW (2005) Temperature and water availability effects on radiation and water use efficiencies in alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Australian Journal of Experimental Agriculture* **45**, 390.

- Cornaglia PS, Sosa P, Garbulsky MF, Deregibus A (2005) Evolución de la cobertura aérea de alfalfa según el arreglo espacial de alfalfa. En: Actas del 28° Congreso Argentino de Producción Animal **25**: 105-106.
- Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M., Robledo C.W. InfoStat versión 2011. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>
- Edwards JT, Purcell LC, Karcher DE (2005) Soybean yield and biomass responses to increasing plant population among diverse maturity groups. II. Light interception and utilization. *Crop Science* **45**, 1778–1785.
- Fick GW, Holt DA, Lugg DG (1988) Environmental physiology and crop growth. En: Hanson AA, Barnes DK, Hill Jr RR (Eds.). Alfalfa and Alfalfa Improvement, Vol. 29. American Society of Agronomy, Madison, USA. Pgs. 163–194.
- Flenet F, Kiniry JR, Board JE, Westgate ME, Reicosky DC (1996) Row Spacing Effects on Light Extinction Coefficients of Corn, Sorghum, Soybean, and Sunflower. *Agronomy Journal* **88**, 185-190.
- GraphPad Prism v.5.00 (2010) GraphPad Software, San Diego California USA, [www.graphpad.com](http://www.graphpad.com).
- Gosse G, Varlet-Grancher C, Chartier M, Allirand JM, Lemaire G (1986) Maximum dry matter production and solar radiation intercepted by a canopy. *Agronomie* **6**, 47–56.
- Gosse G, Lemaire G, Chartier M, Balfourier F (1988) Structure of a lucerne population (*Medicago sativa* L.) and dynamics of stem competition for light during regrowth. *Journal of Applied Ecology* **25**, 609-617.
- Hall, AJ, Villalobos FJ, Orgaz F, Sadras VO (1996) Leaf area index is an important determinant of pre-anthesis radiation use efficiency in sunflowers crops. In: Proceedings 14th International Sunflower Conference, vol 1, Beijing, China, 12-20 June, 622-627.
- Harper JL (1977) Population biology of plants. 8° ed. (Academic Press, New York)
- Heichel GH, Delaney RH, Cralle HT (1988) Carbon assimilation, partitioning, and utilization. En: Hanson AA, Barnes DK, Hill Jr RR (Eds.) Alfalfa and Alfalfa Improvement. Agronomy Monograph 29 Madison, Wisconsin, USA. Pgs. 195–228.
- Hijano EH, Basigalup DH (1995) El cultivo de la alfalfa en la República Argentina. En: Hijano EH, Navarro A (Eds.) La alfalfa en la Argentina. Enc. Agro de Cuyo, Manuales N° 11, San Juan, Argentina. Pgs. 11-18.
- Jefferson PG, Kielly GA (1998) Reevaluation of row spacing/plant density of seeded pasture grasses for the semiarid prairie. *Canadian Journal of Plant Science* **78**, 257-264.
- Khaiti M, Lemaire G (1992) Dynamics of shoot and root growth of lucerne after seeding and after cutting. *European Journal of Agronomy* **1**, 241-247.
- Kruk B, Satorre EH (2004) Densidad y arreglo espacial del cultivo. En: Satorre EH, Benech RL, Slafer GA, De la Fuente EB, Miralles DJ, Otegui ME, Savin R. (Eds.) Producción de granos: bases funcionales para su manejo. Facultad de Agronomía, UBA, Buenos Aires, Argentina. Pgs. 277–316.

- INDEC (2001) Encuesta Nacional Agropecuaria.
- Lemaire G, Onillon B, Gosse G, Chartier M, Allirand JM (1991) Nitrogen Distribution Within a Lucerne Canopy During Regrowth: Relation With Light Distribution. *Annals of Botany* **68**, 483-488.
- Lutz EE, Morley FHW (1982) Production of alfalfa (*Medicago sativa* L.) I. Influence of row spacing and cultivar. *Turrialba* **32**, 1-10.
- Maddonni GA, Chelle M, Drouet JL, Andrieu B (2001) Light interception of contrasting azimuth canopies under square and rectangular plant spatial distributions: simulations and crop measurements. *Field Crops Research* **70**, 1-13.
- Maddonni GA, Cirilo AG, Otegui ME (2006) Row width and maize grain yield. *Agronomy Journal* **98**, 1532-1543.
- Mattera J, Romero LA, Cuatrín A, Grimoldi AA (2009) Efectos de la distancia de siembra sobre la producción de biomasa y la persistencia de un cultivo de alfalfa. *Revista Argentina de Producción Animal* **29**: 131-140.
- Michaud R, Lehman WF, Rumbaugh MD (1988) World distribution and historical development. En: Hanson AA, Barnes DK, Hill Jr RR (Eds.) Alfalfa and alfalfa improvement. Agronomy Monograph 29, Madison, Wisconsin, USA. Pgs. 25-91.
- Monteith JL (1977) Climate and the Efficiency of Crop Production in Britain. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Biological Sciences* **281**, 277-294.
- Mosconi FP, Priano LJJ, Hein NE, Moscatelli G, Salazar JC, Gutiérrez T, Cáceres L. (1981) Mapa de suelos de la Provincia de Santa Fe. INTA. Vol. 1.
- Park SE, Benjamin LR, Watkinson AR (2003) The theory and application of plant competition model: an agronomic perspective. *Annals of Botany* **92**, 741-748.
- Pembleton KG, Rawnsley RP, Donaghy DJ, Volenec JJ (2009) Water deficit alters canopy structure but not photosynthesis during the regrowth of alfalfa. *Crop Science* **49**, 722-731.
- Pontaque FC (2005) Modelos lineales (eBook) (Universidad de Barcelona)
- Purcell LC, Ball RA, Reaper JD, Vories ED (2002) Radiation use efficiency and biomass production in soybean at different plant population densities. *Crop Science* **42**, 172-177.
- Romero LA, Bruno OA, Fossati JL, Quaino OR (1991) Densidad de siembra de alfalfa cultivar CUF 101; número de plantas y producción. *Revista Argentina de Producción Animal* **11**, 411-417.
- Rossanigo RO, Spada MC, Bruno OA (1995) Evaluación de cultivares de alfalfa y panorama varietal en la Argentina. En: Hijano EH, Navarro A (Eds.) La alfalfa en la Argentina. Enc. Agro de Cuyo, Manuales N° 11, San Juan, Argentina. Pgs. 64-78.
- Roufail A (1975) Effect of sowing rate and sowing method on the establishment, yield and survival of irrigated lucerne at Kyabram, Victoria. *Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry* **15**, 64-68.
- Rowe DE (1989) Competition thinning of alfalfa planted at three densities. *Crop Science* **29**, 1357-1361.

- Ruíz RA, Bertero HD (2008) Light interception and radiation use efficiency in temperate quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *European Journal of Agronomy* **29**, 144-152.
- SAS Institute Inc. (2004) SAS OnlineDoc® 9.1.3. Cary, NC: SAS Institute Inc.
- Sharratt BS, McWilliams DA (2005) Microclimatic and Rooting Characteristics of Narrow-Row versus Conventional-Row Corn. *Agronomy Journal* **97**, 1129-1135.
- Sheehy JE, Woodward FI, Jones MB, Windram A (1979) Microclimate, photosynthesis and growth of Lucerne (*Medicago sativa* L.). I. Microclimate and photosynthesis. *Annals of Botany* **44**, 693-707.
- Sinclair TR, Horie T (1989) Leaf nitrogen, photosynthesis, and crop radiation use efficiency: a review. *Crop Science* **29**, 90-98.
- Singels A, Smit MA (2009) Sugarcane response to row spacing-induced competition for light. *Field Crops Research* **113**, 149-155.
- Skinner RH (2005) Emergence and survival of pasture species sown in monocultures or mixtures. *Agronomy Journal* **97**, 799-805.
- Spada MC (2008) Avances en alfalfa: ensayos territoriales. Ediciones INTA, Córdoba, Argentina. v. 18.
- Steiner JL (1986) Dryland Grain Sorghum Water Use, Light Interception, and Growth Responses to Planting Geometry. *Agronomy Journal* **78**, 720-726.
- Teixeira EI, Moot DJ, Brown HE, Fletcher AL (2007a) The dynamics of Lucerne (*Medicago sativa* L.) yield components in response to defoliation frequency. *European Journal of Agronomy* **26**, 394-400.
- Teixeira EI, Moot DJ, Brown HE, Pollock KM (2007b) How does defoliation management impact on yield, canopy forming processes and light interception of Lucerne (*Medicago sativa* L.) crops? *European Journal of Agronomy* **27**, 154-164.
- Travis RL, Reed R (1983) The solar tracking pattern in a closed alfalfa canopy. *Crop Science* **23**, 664-668.
- van der Werf HMG, van Geel WCA, van Gils LJC, Haverkort AJ (1995) Nitrogen fertilization and row width affect self-thinning and productivity of fibre hemp (*Cannabis sativa* L.). *Field Crops Research* **42**, 27-37.
- Varella AC (2002) Modelling lucerne (*Medicago sativa*) crop response to light regimes in an agroforestry system. Doctoral Thesis. Lincoln University, Canterbury, New Zealand.
- Volenc JJ, Cherney JH, Johnson KD (1987) Yield components, plant morphology, and forage quality of alfalfa as influenced by plant population. *Crop Science* **27**, 321-326.
- Willey RW, Heath SB (1969) The quantitative relationships between plant population and crop yield. En: Brady N.C. y Hall R. (eds.) *Advances in Agronomy*. Cornell Univ., Ithaca, NY, USA. Pgs. 281-321.
- Zaffaroni E, Schneiter AA (1989) Water-Use Efficiency and Light Interception of Semidwarf and Standard-Height Sunflower Hybrids Grown In Different Row Arrangements. *Agronomy Journal* **81**, 831-836.

## APÉNDICE

Cuadro I. Distribución de la biomasa de alfalfa en tres jerarquías de tallos (suprimidos, intermedios y dominantes) en el cultivar de alfalfa Monarca para cinco distancias entre hileras a la siembra (10 cm, 15 cm, 17,5 cm, 20 cm y 30 cm) en cuatro rebrotes (septiembre, octubre, diciembre y enero) en el primer año de vida.

Rebrote	Distancia	Proporción de la biomasa por jerarquía de tallo		
		Suprimidos	Intermedios	Dominantes
Septiembre	10	0,06	0,22	0,72
	15	0,05	0,18	0,77
	17,5	0,07	0,23	0,70
	20	0,06	0,22	0,72
	30	0,05	0,27	0,68
	<i>Media</i>	<i>0,06</i>	<i>0,22</i>	<i>0,72</i>
	<i>CV</i>	<i>25,4</i>	<i>23,9</i>	<i>8,7</i>
Octubre	10	0,09	0,24	0,67
	15	0,09	0,27	0,64
	17,5	0,10	0,25	0,65
	20	0,09	0,25	0,66
	30	0,11	0,28	0,61
	<i>Media</i>	<i>0,10</i>	<i>0,26</i>	<i>0,64</i>
	<i>CV</i>	<i>33,3</i>	<i>22,3</i>	<i>10,6</i>
Diciembre	10	0,05	0,30	0,65
	15	0,05	0,29	0,66
	17,5	0,06	0,26	0,68
	20	0,07	0,24	0,69
	30	0,06	0,28	0,66
	<i>Media</i>	<i>0,06</i>	<i>0,27</i>	<i>0,67</i>
	<i>CV</i>	<i>41,4</i>	<i>44,6</i>	<i>20,5</i>
Enero	10	0,05	0,39	0,56
	15	0,05	0,25	0,70
	17,5	0,05	0,31	0,64
	20	0,05	0,31	0,64
	30	0,04	0,32	0,64
	<i>Media</i>	<i>0,05</i>	<i>0,31</i>	<i>0,64</i>
	<i>CV</i>	<i>46,9</i>	<i>38,7</i>	<i>20,8</i>